第 41 卷 第 1 期
2023 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41, No. 1
Mar., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.01.03

近邻亮红外星系观测研究进展

高天牧[1]，U Vivian[2]，宋一清[3]

(1. 北京师范大学 天文系，北京 100875；2. 加州大学尔湾分校 物理与天文学院，尔湾 92697；3. 弗吉尼亚大学 天文学院，夏洛茨维尔 22904)

摘要： (极) 亮红外星系在星系演化过程中扮演了重要的角色，其主要由富气体的旋涡星系并合形成，并伴随着剧烈的恒星形成活动以及可能的活动星系核活动。受星暴和活动星系核加热的尘埃在红外波段的再辐射使这类星系有极高的红外光度。随着各种先进天文观测设备的投入使用，对近邻宇宙中 (极) 亮红外星系的观测研究取得了许多重要进展。首先介绍了由最新研究获得的近邻 (极) 亮红外星系在各波段的观测特征，然后介绍了与近邻 (极) 亮红外星系相关的研究热点，最后讨论了未来相关的研究计划。

关 键 词： 星系演化；(极) 亮红外星系；恒星形成；活动星系核

中图分类号： P157.7 **文献标识码：** A

1 引 言

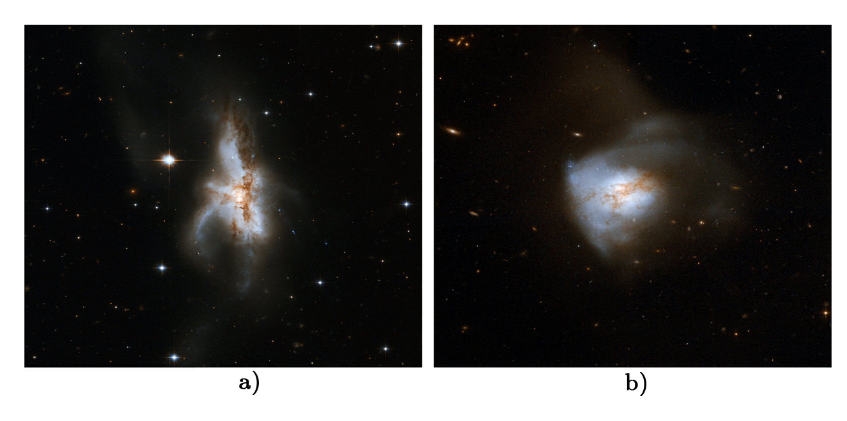
(极) 亮红外星系 ((ultra) luminous infrared galaxies, (U)LIRGs, 光度 $L_{8\sim1\,000\ \mu\text{m}} \geqslant 10^{11(12)}L_\odot$, $L_\odot$ 为太阳光度) (见图 1) 是星系演化过程中一个短暂而重要的阶段。相关研究起源于红外天文卫星 (infrared astronomical satellite, IRAS) 在巡天过程中的发现，即近邻宇宙中有 629 个在 60 μm 波长处辐射流量密度大于等于 5.24 Jy 的星系[1]。这类在红外波段辐射强于其他波段辐射总和的天体的发现，激起了人们对其能量来源的强烈研究兴趣。观测表明，(U)LIRGs 主要由富气体的旋涡星系并合形成，包含处于各个并合阶段的星系，且富含分子气体和尘埃[2]。并合会导致大量气体、尘埃因失去角动量落入星系中心区域，进而引发剧烈的恒星形成活动——星暴，同时使星系中心超大质量黑洞 (supermassive black holes, SMBHs) 的质量迅速增加，还可能激发活动星系核 (active galactic nuclei, AGN) 活动。与非并合星系相比，(U)LIRGs 中的并合星系的恒星形成率 ($10 \sim 100\,M_\odot \cdot \text{a}^{-1}$, $M_\odot$ 为太阳质量) 较高，包含 AGN 的比例也更高[2]，其红外波段辐射主要来源就是星暴和 AGN 加热的

收稿日期： 2022-02-17； **修回日期：** 2022-04-25

资助项目： 国家自然科学基金 (12021003, 11920101003, 11633001)

通讯作者： 高天牧，201921160006@mail.bnu.edu.cn

尘埃热辐射。较亮的 ULIRGs 大多属于晚期并合星系，相较 LIRGs 有着更高的恒星形成率和 AGN 比例，与高红移产星星系有相似的性质[3, 4]，被认为是类星体 (quasi-stellar objects, QSOs)[5] 和大质量椭圆星系[6, 7] 形成前的一个过渡阶段。红外空间天文台 (Infrared Space Observatory, ISO) 和斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope) 的观测显示，(U)LIRGs 主导了红移 $z > 1$ 宇宙中的恒星形成活动，并贡献了超过 50% 的红外流量密度[8–10]。



a) b)

注：图片来自 NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration and Evans A (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)。

图 1 a) **亮红外星系** NGC 6240 ($L_{\rm IR} = 10^{11.93} L_{\odot}$)；b) **极亮红外星系** Arp 220 ($L_{\rm IR} = 10^{12.28} L_{\odot}$)[11, 12]

近年来，天文观测技术，尤其是自适应光学和射电干涉技术的发展，使对近邻 (U)LIRGs 中由星系并合所产生的各种天体物理现象，如恒星形成、超大质量黑洞吸积、外向喷流等的高分辨率观测研究取得了巨大进展。这些研究的深层次意义在于：(1) 通过研究近邻宇宙、低红移处 (U)LIRGs，人们可以推断在早期宇宙、高红移处同类型星系的物理性质，进而了解这类星系在星系演化过程中所扮演的角色；(2) 在当今多信使天文学蓬勃发展的背景下，对并合星系中超大质量黑洞周围环境的研究有利于人们深入了解引力波电磁对应体。

GOALS (The Great Observatories All-sky LIRGs Survey) [13] 项目利用当前最先进的观测设备，包括核分光望远镜阵 (Nuclear Spectroscopic Telescope Array, NuSTAR)、钱德拉 X 射线天文台 (Chandra X-ray Observatory, Chandra)、星系演化探测器 (Galaxy Evolution Explorer, GALEX)、哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST)、Spitzer、赫歇尔红外空间望远镜 (Herschel Infrared Space Telescope, Herschel)、凯克望远镜 (Keck Telescopes)、阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵 (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array, ALMA) 以及甚大阵 (Very Large Array, VLA) 等，积累了红移 $z < 0.088$ 的 21 个 ULIRGs 和 180 个 LIRGs 各个电磁波段高分辨率的观测数据。基于 GOALS 项目已有观测研究成果，本文综述了近些年来对 (U)LIRGs 所做观测研究取得的进展。相关文章主要有介绍 IRAS 和 ISO 时代 (U)LIRGs 多波段观测特征[2, 14]，以及后续有关特定波段的综述，例如关于 Herschel 成果的远红外巡天综述[15]、Spitzer 对 (U)LIRGs 中红外光谱观测的综述[16] 以及关于 (U)LIRGs 红外至射电波段观测特征的综述[17]。相较于以上这些文章，本文在中远红外部分也引用了

源自 Spitzer 和 Herschel 的成果，同时整体上更多介绍了近 10 年来，由当前最先进的观测设备在X射线到射电全波段上取得的研究进展。本文第 2 章介绍了近邻宇宙中 (U)LIRGs 各波段的观测特征，第 3 章简述了相关研究热点，最后对未来的相关研究提出展望。

2 (U)LIRGs 各波段观测特征

本章主要围绕近邻 (U)LIRGs 研究中最关键的问题——星系核心区域是否存在 AGN，对近邻 (U)LIRGs 由 X 射线到射电的各波段观测特征进行归纳，同时还介绍了例如激波、气体冷却等 (U)LIRGs 中的天体物理过程。这其中许多 (U)LIRGs 的形态和光谱特征都佐证了 LIRGs 到 ULIRGs，最后到 QSOs 这一演化路径。此外，还介绍一些在观测近邻 (U)LIRGs 时发现的可以研究高红移星系的方法，以及在研究高红移星系时需要注意的事项。

2.1 X 射线波段

(U)LIRGs 的 X 射线辐射主要由较为弥散的软 X 射线辐射和致密的硬 X 射线核组成。Ptak 和 Franceschini 团队分别利用 Chandra 和多镜面 X 射线空间望远镜 (X-ray Multi-mirror Mission, XMM-Newton) 研究了小样本的 (U)LIRGs，并讨论了 X 射线光谱的特征[18, 19]。在 $0.5\sim2\,\mathrm{keV}$ 的软 X 射线波段，被大质量恒星和超新星爆发产生的星风加热的星际介质为主要的辐射来源，可产生 $0.3\sim0.7\,\mathrm{keV}$ 的热等离子体连续辐射；而在 $2\,\mathrm{keV}$ 以上的硬 X 射线波段，(U)LIRGs 的辐射呈现幂律谱特征，并有两个主要来源，即大质量 X 射线双星和 AGN。在红外光度 $L_{\mathrm{IR}}<10^{11}L_{\odot}$ 的近邻产星星系中，硬 X 射线辐射被发现与远红外辐射有相关关系[20–22]。这是因为大质量 X 射线双星主要演化自年轻 O, B 型星，所以此时硬 X 射线辐射强度与恒星形成率相关，而远红外辐射强度也与恒星形成率有很好的相关性[23, 24]。但在 $L_{\mathrm{IR}}>10^{11.73}L_{\odot}$ 及无 AGN 的 (U)LIRGs 中，观测到的硬 X 射线辐射强度普遍低于通过远红外光度与硬 X 射线-远红外关系计算得到的值，在 ULIRGs 中这一现象尤为明显。一个可能的解释是，处于星系中心区域大质量 X 射线双星的辐射被柱密度极高的介质掩盖[25]。

包含 AGN 的 (U)LIRGs 的硬 X 射线辐射强度比不包含 AGN 的高约一个量级 ($2\sim10\,\mathrm{keV}$ 光度 $L_{2\sim10\,\mathrm{keV}}>10^{35}\,\mathrm{W}$)，也显著高于其自身软 X 射线辐射强度。利用 X 射线光度以及颜色 ($HR=(H-S)/(H+S)$，其中 H 和 S 分别为硬、软波段接收到的光子数)，我们可以判断 (U)LIRGs 辐射的能量来源。在一些情况下，(U)LIRGs 核心区域的介质甚至对于硬 X 射线辐射也是光学厚的，因此硬 X 射线辐射被介质大量吸收，光度大幅下降。这时就需要通过 (U)LIRGs 光谱中 $6.4\,\mathrm{keV}$ 附近是否出现受黑洞吸积盘辐射加热的气体产生的 Fe Kα 发射线，来判断 AGN 是否存在。Iwasawa 等人[26] 分析了 44 个 $L_{\mathrm{IR}}>10^{11.73}L_{\odot}$ 的 (U)LIRGs 的 Chandra X 射线数据，用 $HR>-0.3$ 和 Fe Kα 线为判断标准，在其中 16 个星系中发现了 AGN 的特征。在这 16 个 AGN 中，12 个处于较亮 ($L_{\mathrm{IR}}>10^{12}L_{\odot}$) 的样本星系中，NGC 6240 是其中唯一包含双 AGN 的星系。根据计算结果可知，这些 AGN 对于星系整体红外辐射的贡献率仅约 10%。而在拥有 Chandra 数据的 63 个 $L_{\mathrm{IR}}=10^{11.0}\sim$

$10^{11.73}L_{\odot}$ 的 LIRGs 中，有 24 个被发现包含有 AGN[27]。将仅在中红外波段而没有在 X 射线波段体现出 AGN 特征的星系考虑在内，在 $L_{\rm IR} > 10^{11.73}L_{\odot}$ 样本中有 $(38\pm7)\%$ 的子星系被分类为 AGN，而在 $L_{\rm IR} = 10^{11.0} \sim 10^{11.73}L_{\odot}$ 样本中这一比例为 $(31\pm5)\%$，这表明 (U)LIRGs 中存在 AGN 的比例随红外光度的增大而升高。

对 (U)LIRGs 的 X 射线波段观测揭示了大量处于并合星系中的 AGN 被尘埃严重遮挡，所以在研究大样本 AGN 时，使用不同波段巡天数据进行对比证认就显得比较重要。上述研究也正是利用 X 射线波段分辨 AGN 的方法，即 X 射线颜色分析。

2.2 紫外波段

在 (U)LIRGs 中，紫外辐射由年轻恒星和 AGN 产生。一部分紫外辐射被尘埃吸收，并在远红外被再辐射，这一能量转换关系可以用红外超 (infrared excess, IRX) 与紫外颜色 β 两个量加以量化，其中 IRX 定义为 $8\sim1\,000\ \mu$m 红外与远紫外流量之比，即：

$$IRX = \lg(f_{\rm IR}/f_{\rm FUV}) \quad . \tag{1}$$

对于 GALEX，β 的定义为：

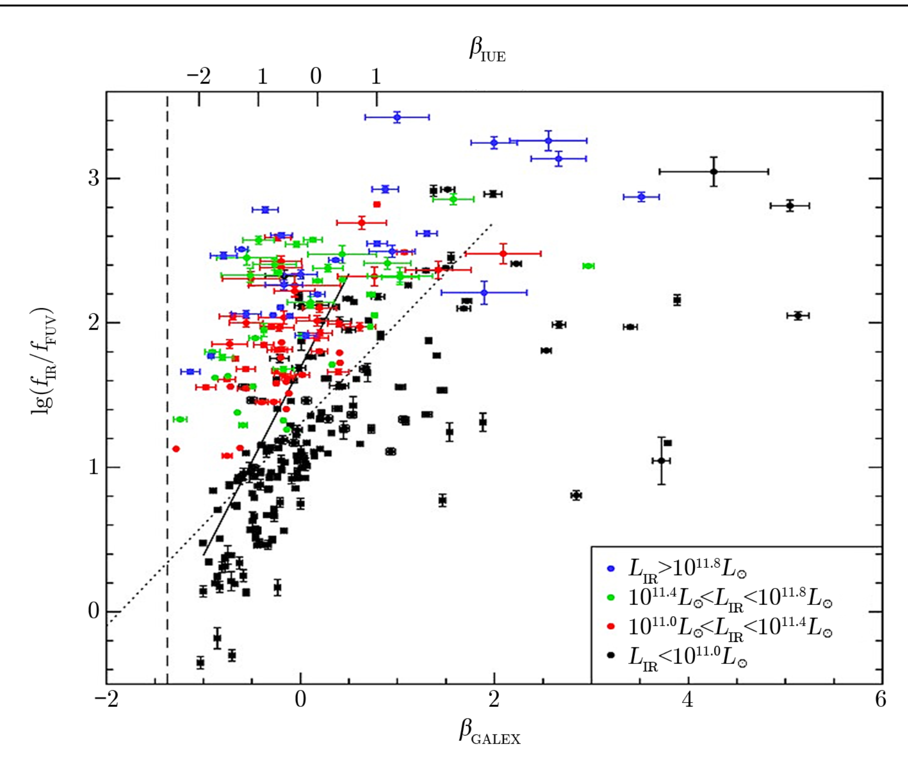
$$\beta_{\rm GALEX} = \frac{\lg(f_{\rm FUV}) - \lg(f_{\rm NUV})}{-0.182} \quad , \tag{2}$$

其中，$f_{\rm FUV}$ 和$f_{\rm NUV}$ 分别为远紫外和近紫外单位波长的平均辐射流量[28]。GOALS 样本中共有 135 个 (U)LIRGs 被 GALEX 在远紫外 (波长 $\lambda_{\rm eff} = 1\,528$ Å) 和近紫外 (波长 $\lambda_{\rm eff} = 2\,271$ Å) 波段观测过。Howell 等人[29]挑选了其中 112 个数据质量较高的源，用 GALEX 的紫外数据和 Spitzer 的红外数据绘制了 (U)LIRGs 的 IRX-β 关系 (见图 2)。两者之间的线性关系可近似表达为：

$$IRX = (0.46\pm0.06)\beta + (2.1\pm0.1) \quad . \tag{3}$$

图 2 中，黑色点对应 $L_{\rm IR} < 10^{11}L_{\odot}$，红色点对应 $10^{11}L_{\odot} < L_{\rm IR} < 10^{11.4}L_{\odot}$，绿色点对应 $10^{11.4}L_{\odot} < L_{\rm IR} < 10^{11.8}L_{\odot}$，蓝色点对应 $L_{\rm IR} > 10^{11.8}L_{\odot}$。(U)LIRGs 主要位于 Meurer 等人[30]基于一般星暴星系给出的 IRX-β 关系 (图中实线) 上方，仅有约 15% 的 (U)LIRGs 位于趋势线下方。而 Cortese 等人[31]对晚型星系的拟合结果 (图中虚线) 则清晰地给出了 (U)LIRGs 与 $L_{\rm IR} < 10^{11}L_{\odot}$ 星系的分界。总体来说，在紫外颜色 β 相近的情况下，(U)LIRGs 有较大的 IRX 值；越亮的 (U)LIRGs，IRX 越大，颜色越红 (β 越大)。根据 Charlot 和 Fall[32]提出的尘埃模型，IRX-β 关系反映了星系内尘埃光深的变化，故这一趋势反映了 (U)LIRGs 越亮，则其中有越多的尘埃参与了对年轻恒星和 AGN 紫外辐射的吸收。这与理论中 LIRGs 到 ULIRGs，最后到 QSOs 的演化过程是一致的。在并合过程中，大量气体和尘埃先是涌入星系核心区域，产生剧烈星暴，而后在演化到 QSOs 的最后阶段被 AGN 和星暴产生的风吹散。

另外在子星系可被 GALEX 和 Spitzer 分辨出的并合星系中，有 32% 红外辐射和紫外辐射由不同的子星系主导。这一发现意味着在研究高红移并合星系时，通过观测得到的并合星系物理特征可能与其子星系有较大差异。



注：图片来自 Howell J H, et al. The Great Observatories All-sky LIRG Survey: Comparison of Ultraviolet and Far-infrared Properties. ApJ, 2010, 715: 572, doi: 10.1088/0004-637X/715/1/572. © AAS. Reproduced with permission。

图 2　GOALS 样本中 (U)LIRGs 的 IRX-β 关系[29]

2.3　光学与近红外波段

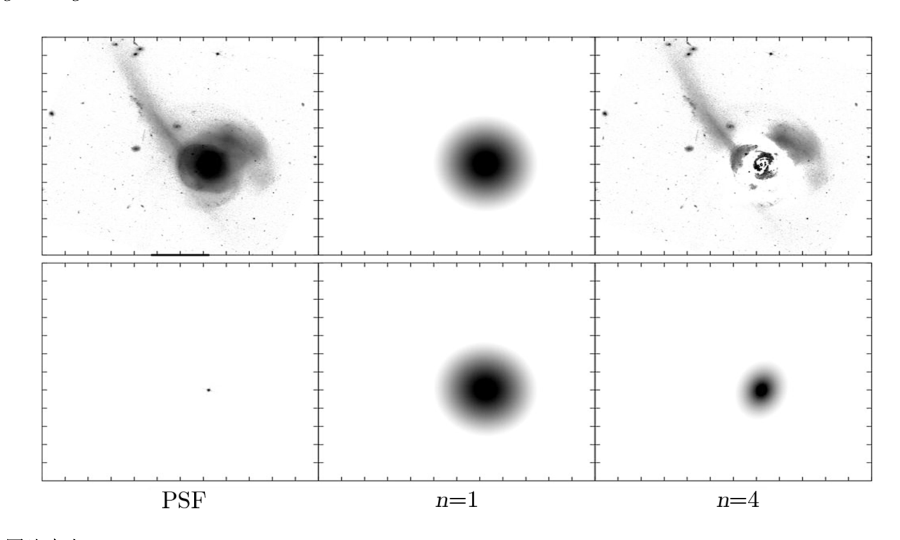
2.3.1　图像观测

由于近红外辐射受尘埃消光影响较小，且近红外波段的观测可以达到比中远红外更高的分辨率，故通过高分辨率近红外观测可以研究星系核心区域的 AGN 和星暴。对近邻 (U)LIRGs 的近红外观测发现，在 ULIRGs 大都为并合系统的同时，有相当数量的 LIRGs 仍是子星系相距较远的星系对，甚至是非并合星系[33]。Haan 等人[34]使用 HST 上的近红外线照相机和多目标分光仪 (Near Infrared Camera and Multi-object Spectrometer, NICMOS) 在 H 波段拍摄的图像，研究了 73 个 (U)LIRGs 的形态特征，发现很大一部分 (U)LIRGs 包含双核 (63%) 或者三核 (6%)。LIRGs 两核之间距离的中间值为 6.7 kpc，ULIRGs 则为 1.2 kpc，这说明 LIRGs 对应星系并合的早期阶段，ULIRGs 则对应星系并合的晚期阶段。这项研究还发现，其样本中有一半在 H 波段被观测到有双核的系统，其星系核在 B 波段由于尘埃的遮挡完全不可见。这意味着在对高红移 ($z>2$) 的 (U)LIRGs 进行近红外观测时，由于接收到的实际上是星系在 B 波段发出的辐射，所以在统计多核系统的数量时需要进行修正。实际观测发现高红移处 (U)LIRGs 中并合系统的比例显著低于近邻 (U)LIRGs，也证实了这一点[35–37]。

相比于近红外波段，光学波段被大量尘埃遮蔽，较难观测到 (U)LIRGs 核心区域的 AGN、星团等。然而利用一些光学观测设备，例如 HST 搭载的先进巡天照相机 (Advanced Camera for Surveys, ACS) 的大视场 ($202'' \times 202''$) 和高空间分辨率 (约 $0.05''$)，我们可以在光学波段对星系中各种较大尺度结构特征，诸如核球、星系棒、星系盘、潮尾等进行细致研究。HST GOALS 项目利用 ACS 收集了所有 $L_{\rm IR} > 10^{11.4} L_\odot$ 的 (U)LIRGs B 波段和 I 波段的数据。基于 I 波段图像数据，Kim 等人[38]使用 GALFIT[39]拟合了 85 个星系 (64 个 LIRGs 和 21 个ULIRGs) 的表面亮度轮廓 (见图 3)。拟合所用模型分为两部分，第一部分是对应星系核心点源的点扩散函数；第二部分则是用于模拟核球和星系盘的 Sérsic 模型[40]，其表达式为：

$$\Sigma(r) = \Sigma_e \mathrm{e}^{-\kappa[(r/r_e)^{1/n}-1]} \quad , \tag{4}$$

其中，Σ_e 和 r_e 分别为有效面亮度和半径，$n = 1$ 对应盘结构，$n = 4$ 对应核球结构。



注：图片来自 Kim D C, et al. Hubble Space Telescope ACS Imaging of the GOALS Sample: Quantitative Structural Properties of Nearby Luminous Infrared Galaxies with $L_{\rm IR} > 10^{11.4}\ L_\odot$. ApJ, 2013, 768: 102, doi: 10.1088/0004-637X/768/2/102. © AAS. Reproduced with permission。

图 3 NGC 0034 表面亮度拟合结果[38]

图 3 上方从左至右分别为原始星系图像、表面亮度拟合结果和残差；下方从左至右分别为模型中点源、盘 ($n = 1$) 和核球 ($n = 4$) 成分。拟合的结果中盘星系占 32.1%，既有盘又有核球结构的星系占 48.9%，椭圆星系占 19%。LIRGs 中盘星系比例较高 (34.5%)，ULIRGs 中则有较多的椭圆星系 (33.3%)。同时拥有两种结构的星系在 LIRGs 与 ULIRGs 中均占较高比例，分别为 50% 和 45%，而在 60% 的此类星系中核球与盘的贡献之比小于 1，也就是说其中多数 (U)LIRGs 结构由星系盘主导。在子星系相距较远 ($30 \sim 70$ kpc) 的早期并合星系中，包含棒状结构的星系占 57%，与近邻宇宙中旋涡星系类似 ($48\% \sim 55\%$)[41]；而在子星系的核已无法分辨的晚期并合中，这一比例仅为 6.3%，意味着棒状结构多在并合末期瓦解。最后，基于子星系的光度，在假设质光比相同的情况下，发现 GOALS 样本中的

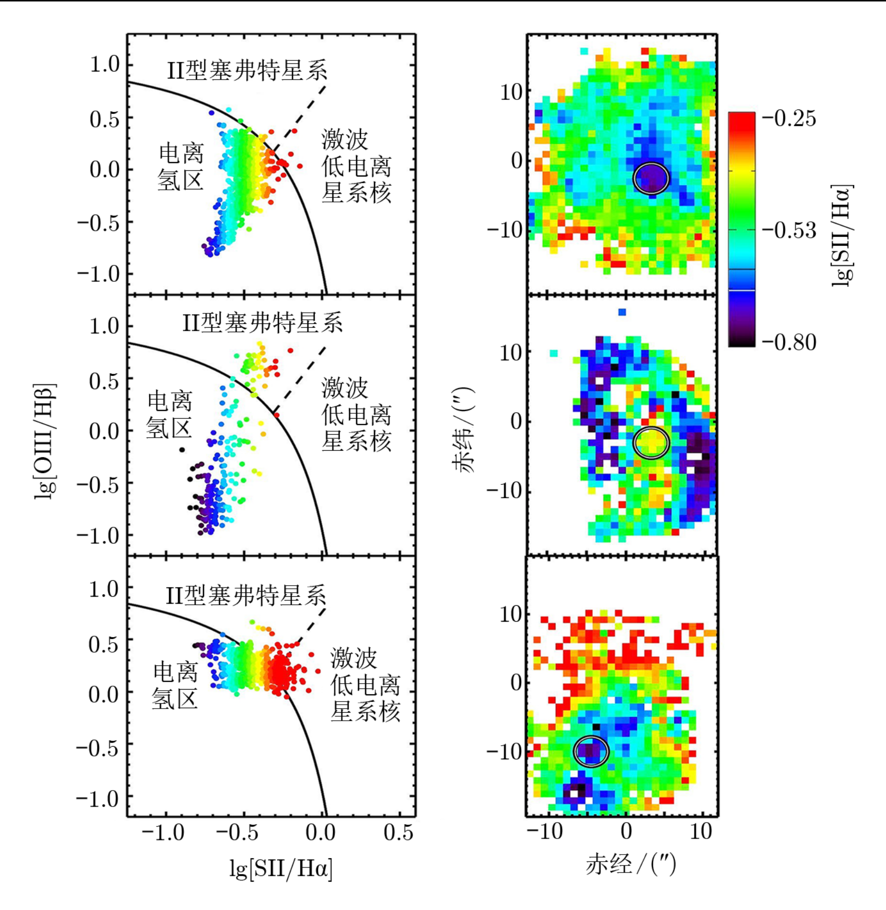
绝大多数并合星系都是主并合，即质量较小的星系与质量较大的星系质量比大于 1/4，仅有约 7% 的并合是子并合。形成并合星系的子星系的平均质量比为 0.55 ± 0.23，在这一特征上 ULIRGs 与 LIRGs 并未体现出明显差异。

2.3.2　光谱观测

在光学波段，(U)LIRGs 包含属于不同光谱型分类的源，例如 I, II 型塞弗特星系、星暴星系和低电离星系核 (low-ionization nuclear emission-line region, LINER)；其中 AGN 的比例随星系红外光度的增大而提高，50% 以上 ULIRGs 的光学波段光谱具有 AGN 的特征[42]。Rich 等人[43]使用积分视场光谱仪在光学波段对小样本 (U)LIRGs 的研究发现，在许多 (U)LIRGs 中存在以激波为电离源的气体辐射区域。激波主要由星系并合导致的气体碰撞、潮汐作用以及由 AGN 或星暴产生的气体外向流造成，受激波影响区域气体速度弥散约为 $100 \sim 200\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$[44, 45]。在 BPT 图中[46–48]，激波造成的辐射与 LINER 类似，较以热星为电离源的 H II 区有较强的低电离度电子发射线，例如 [S II]6717 Å, 6731 Å 和 [O I]6300 Å, 6364 Å，相应地有较高的 [S II]/[Hα] 和 [O I]/[Hα][45]。在空间分布上，激波会在星系外围区域造成类似 LINER 的辐射区域，星系核心区域则呈 H II 区辐射特征[44, 45]；这与由 AGN 主导的星系由核心向外围线强比逐渐降低的趋势相反。图 4 展示了 3 个星系的[S II]/[Hα] 分布以及对应区域在 BPT 图中的分布，其中 IRAS F17222-5953 的气体发射由 H II 区主导，IRAS F21453-3511 包含 AGN[49]，而 IRAS F01053-1746 中则存在激波产生的辐射[45]。综合上述激波电离区域特征，该项研究发现，随着并合的进行，对于不包含 AGN 的星系，激波对发射线的贡献逐渐提升；在 7 个晚期并合星系中，有超过 50% 的 Hα 辐射由激波造成。而在并合初期，发射线则主要由 H II 区产生。

(U)LIRGs 的光谱能量分布，在 $0.3 \sim 2\,\mu\mathrm{m}$ 范围内会出现一个由恒星热辐射产生的峰。平均下来，在 ULIRGs 中，其峰值比远红外波段的尘埃辐射峰值低约 1.2 个量级；而在 LIRGs 中则低约 0.7 个量级[50]。此外，在近红外波段也有一系列氢原子复合线、热 H_2 分子转动-振动谱线以及一些金属发射线。通常情况下光学波段的 Hα, Hβ 线由于易于观测，常用作示踪恒星形成活动，但在 (U)LIRGs 中，尤其是在星系核心区域，这两条线受到尘埃消光的影响较大 (对于 LIRGs，V 波段消光 $A_\mathrm{V} \approx 3\,\mathrm{mag}$[33]；对于 ULIRGs，$A_\mathrm{V} > 10\,\mathrm{mag}$[51])。相比之下，红外波段的氢原子复合线，例如 Paα 受尘埃消光影响较小 ($A_{\mathrm{Pa}\alpha} \approx 0.1 A_\mathrm{V}$[52])，因此适合用来示踪 (U)LIRGs 中的恒星形成活动。但由于大气不透明度的原因，对于近邻 (U)LIRGs 中 Paα 线的观测只能由空间望远镜进行。

与光学波段的 BPT 图类似，近红外的 [Fe II]$1.26\,\mu\mathrm{m}$/Paβ 和 H_2 $2.12\,\mu\mathrm{m}$/Brγ 线强比也可以用于区分 (U)LIRGs 中不同的辐射来源，其中激波造成的类 LINER 辐射有最高的线强比，比 AGN 高 2 倍，而比星暴星系高 5 倍以上[53]。AGN 的存在也会让 (U)LIRGs 光谱出现较宽的 Paα 发射线，同时还会出现 [Si VI]$1.963\,\mu\mathrm{m}$ 发射线[54, 55]。结合光学和红外波段的积分光谱仪观测数据，Medling 等人[56]在 IRAS F17207-0014 中发现了两种不同起源的激波。第一个激波成分由星系并合过程中星际介质碰撞产生，影响范围遍布整个星系核心区域，对应 $H_2/\mathrm{Br}\gamma \approx 0.6 \sim 4$；第二个激波成分源于由星系核发出的由星暴造成的气体外向流，延展范围约 400 pc，对应 $H_2/\mathrm{Br}\gamma \approx 4 \sim 8$，而在视场较大的光学光谱中亦找到了星系



注：从上到下分别为IRAS F17222-5953，F21453-3511 和 F01053-1746。图片来自 Rich，J. A.，et al. Galaxy Mergers Drive Shocks: An Integral Field Study of GOALS Galaxies. ApJS, 2015, 221: 28, doi: doi:10.1088/0067-0049/221/2/28. © AAS. Reproduced with permission。

图 4 IRAS F17222-5953, F21453-3511 和 F01053-1746 中 [S II]/[Hα] 分布以及对应区域在 BPT 图中的分布[43]

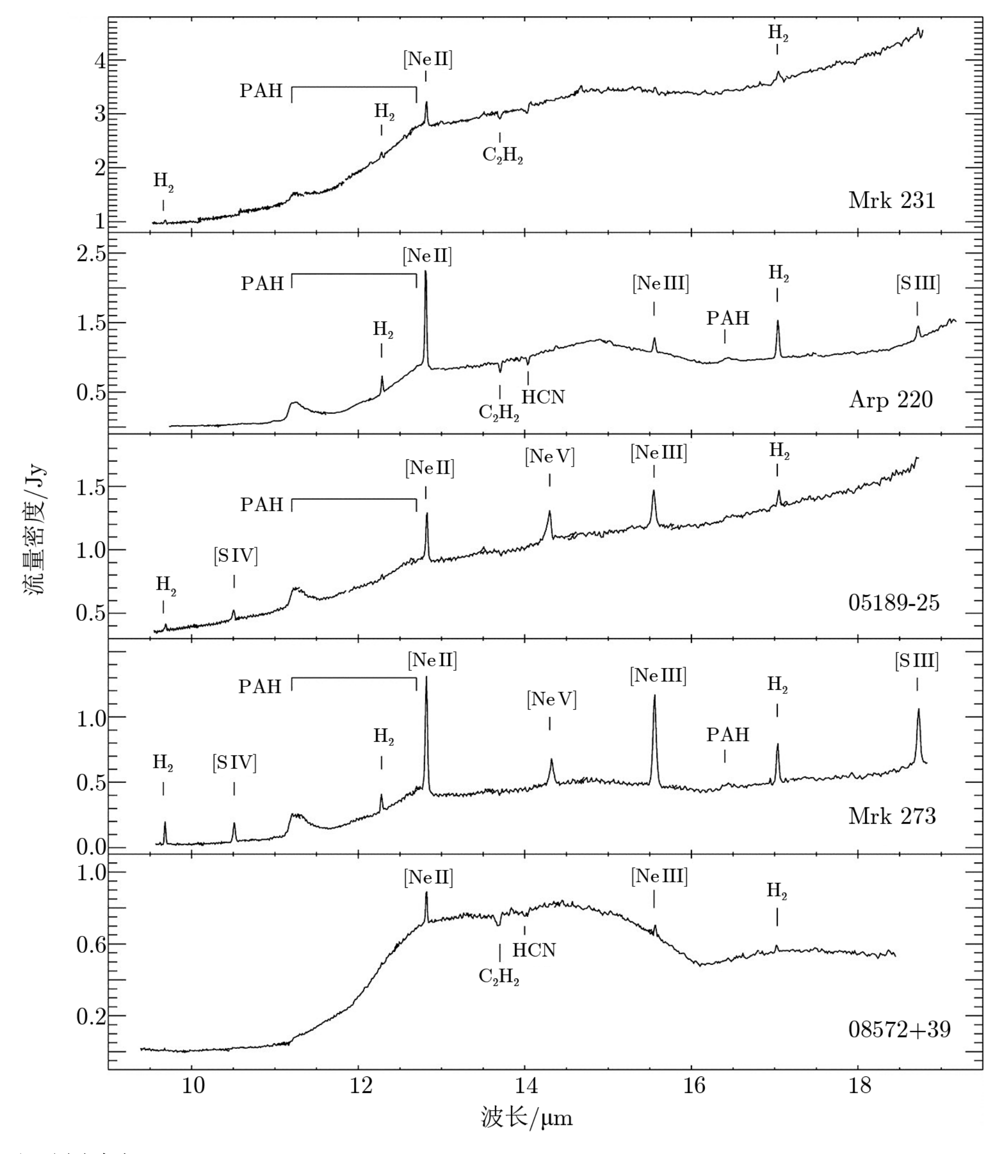
尺度气体外向流存在的证据。这一研究的意义在于，首次将对星系核的小范围高分辨率光谱观测与对整个星系的大范围光谱观测相结合，探究了不同尺度上的气体发射机制，并提供了一种新的研究恒星形成与 AGN 以及它们对星系演化影响的方法。

2.4 中红外波段

天文学家们使用 Spitzer (波长范围 3.6 ~ 160 μm) 在中红外波段对 (U)LIRGs 进行了许多观测研究。在中红外波段，(U)LIRGs 的辐射大多数是延展的，且 LIRGs 延展的范围比 ULIRGs 大 2 ~ 3 倍；在 13.2 μm 处，ULIRGs 核心的尺寸仅约 1.5 kpc。整体而言，处于并合末期、AGN 对于中红外辐射贡献较高的 (U)LIRGs 更为致密[57]。

在尘埃热辐射连续谱的基础上，(U)LIRGs 的中红外光谱中包含源自星系核心区域不同电离度的原子发射线 (例如 [O IV], [Ne II], [Ne III], [S III])，H_2 分子转动发射线以及多

环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) 发射线等谱线 (见图 5)。受紫外光子加热 PAH 产生的宽发射线常见于产星星系的光谱中，有时强度可以达到总红外辐射的 10% 或更高[58, 59]，可用于示踪星系中光致离解区 (photo-dissociation region, PDR) 的分布。AGN 对 PAH 有较大影响，其产生的 X 射线辐射会瓦解 PAH 分子，使 PAH 发射线与尘埃热辐射连续谱的相对强度，即发射线等值宽度降低[60, 61]。与 ULIRGs 相比，GOALS 样本中 LIRGs 的 PAH 6.2 μm 发射线的平均线宽较大，两者的平均线宽分别为 0.30 μm 和 0.55 μm[62]。



注：图片来自 Armus L, et al. Observations of Ultraluminous Infrared Galaxies with the Infrared Spectrograph on the Spitzer Space Telescope. II. The IRAS Bright Galaxy Sample. ApJ, 2007, 656: 148, doi: 10.1086/510107. © AAS. Reproduced with permission。

图 5　Spitzer 观测到的 ULIRGs 中红外光谱[63]

由于中红外辐射可以穿透尘埃的阻挡，故中红外光谱是一种研究 (U)LIRGs 星系核的有效工具。一些谱线，例如由 AGN 造成的高电离度 [Ne V] 线是否存在[64]，以及 PAH 3.3, 6.2 μm 等发射线的谱线宽度大小[65, 66]可以用于判断星系核心区是否有 AGN。有为数不少的星系在光学波段并没有被分类为 AGN，而在中红外波段被观测到具有 AGN 的特征[67, 68]。Petric 等人[69]利用 [Ne V] 线作为依据，发现 GOALS 样本中 (U)LIRGs 总计 248 个星系核至少有 18% 为 AGN；结合原子谱线、PAH 发射线宽以及尘埃连续谱计算得到由 AGN 主导辐射的 (U)LIRGs 仅占 10%，AGN 对总红外辐射的贡献则为约 12%，也即 (U)LIRGs 的主要能量来源仍是星暴。而如果单独考虑 ULIRGs，AGN 对总红外辐射的贡献则为 30% ~ 40%，对应到每个个体，这个值为小于 10% 到约 100% 不等[70]。ULIRGs 中大量 AGN 与星暴混合系统的出现说明，在并合过程中超大质量黑洞与星系的演化是同步进行的。

除了用于确定 (U)LIRGs 强烈红外辐射的能量来源，中红外光谱亦可用于研究星际介质中气体和尘埃的特性。H_2 分子的转动谱线普遍存在于 (U)LIRGs 中红外光谱中，这表明 (U)LIRGs 内部存在大量温度 $T > 200\,\mathrm{K}$ 的温分子气体，其质量在较亮的 ULIRGs 中可达 $10^8 \sim 10^9\,M_\odot$[63, 71]。温 H_2 气体主要是年轻大质量恒星和 AGN 向周围星际介质释放能量的结果，同时还有约 10%(U)LIRGs 的 H_2 辐射显著高于以恒星为单一能源模型给出的理论值，这间接证明了额外的能量输入过程，即 AGN 反馈的发生[72]。相应地，受 AGN 影响的 H_2 有较高的温度和较宽的发射线轮廓。

除了各种发射线，(U)LIRGs 光谱在 9.7 μm 和 18 μm 还有 Si 的吸收特征，其强度与两条吸收线的强度比可以用于限制尘埃的光深和化学成分。研究显示 (U)LIRGs 中 Si 吸收强度 $S_{9.7\,\mu\mathrm{m}}$ 和中红外光谱斜率 $F_\nu[30\mu\mathrm{m}]/F_\nu[15\mu\mathrm{m}]$，均随并合的进行和红外光度的增大而增大[62]。整体而言，GOALS 样本中的 ULIRGs 有着比 LIRGs 更强的 Si 吸收和更陡的中红外连续谱，两者 $S_{9.7\,\mu\mathrm{m}}$ 的均值分别为 −1.5 和 −0.25 ($S_{9.7\,\mu\mathrm{m}}$ 越小表示吸收越强)，中红外光谱斜率的中间值则分别为 12.54 和 7.11。这表明在星系并合过程中越来越多的尘埃落入星系核心区域，使星系核被更严重遮蔽的同时变得更为致密，继而使尘埃温度升高。

2.5 远红外波段

(U)LIRGs 有 50% 以上的辐射集中在远红外波段。尘埃吸收高能光子，并在远红外波段再辐射，热辐射峰值在 50 ~ 100 μm 之间。极强的远红外辐射反映了 (U)LIRGs 极高的恒星形成率。

在 (U)LIRGs 中加热气体的主要有辐射场 (例如年轻恒星的紫外辐射和 AGN 的 X 射线辐射)、高能量粒子 (宇宙线) 以及各种湍流、星风、气体外向流等，而精细结构线则是气体的主要冷却机制之一。欧洲空间局的 Herschel 空间望远镜在远红外至亚毫米波段的观测能力非常强，天文学家利用其研究了 (U)LIRGs 光谱中各种精细结构谱线，如 [O I]63 μm, [O III]88 μm, [N II]122 μm, [C II]158 μm, [N II]205 μm 等。

[C II]158 μm 辐射是产星星系中星际介质的主要冷却机制，最高可以占到星系总红外辐射的约 1%[73, 74]，主要来自 PDR，也有部分来自电离气体。在 PDR 中，受紫外光子加热的 PAH 释放出光电子，这些光电子将动能传递给氢原子，氢原子再以与 C^+ 原子碰撞的方式

释放能量，激发 [C II]158 μm 辐射[74]。Díaz-Santos 等人[75]发现，GOALS 样本中 (U)LIRGs 的 [C II]158 μm 与远红外辐射之比 [C II]/FIR，随着尘埃温度 $T_{\rm dust}$ 以及红外辐射面密度 $\Sigma_{\rm IR}$ 的增大，由约 10^{-2} 急剧减小至 10^{-4}，这说明 [C II]158 μm 线并不能很好地反映恒星形成率。除了 [C II]158 μm 线，这一现象也不同程度地发生在 [O I]63 μm, [N II]122 μm, [N II]205 μm 线上[76]，被称为精细谱线“亏损”。“亏损”的原因主要是在致密星暴中，较强的辐射场使尘埃的冷却效率升高，更多处于 H II 区中靠近 PDR 的尘埃通过吸收来自恒星的高能光子被加热至更高温度，导致尘埃的红外辐射大大增加[76]。因此，样本中 ULIRGs 与 LIRGs 在 [C II]/FIR 上的差异 (中间值分别为 6.3×10^{-4} 和 2.8×10^{-3}) 也反映了 ULIRGs 中的星暴活动更猛烈。

该研究还发现样本中 70% 包含 AGN 的星系有 [C II]/FIR $\geqslant 10^{-3}$，与纯星暴星系相近 (平均值为 4×10^{-3})，而剔除掉样本中所有包含 AGN 的星系后，“亏损”现象依然存在，说明这一现象的发生与 AGN 的存在并无关联，同时说明 AGN 对 (U)LIRGs 远红外连续谱辐射的贡献处于次要地位[75]。

[O I]63 μm 线是重要性仅次于 [C II]158 μm 线的气体冷却机制，随着气体温度和密度的升高，其对星际介质冷却的贡献不断增大；在一般产星星系中其强度仅为 [C II]158 μm 的 20%，而到了一些极端的星暴星系其甚至强于 [C II]158 μm。对小样本 (U)LIRGs 的研究得到两者对于中性气体冷却的贡献分别为 30.1% 和 33.6%[78]。大部分 [O I]63 μm 辐射亦来自 PDR，且与 [C II] 相近光深处，在光学薄的情况下，其与来自 PDR 的 [C II] 辐射之比与尘埃温度有良好的相关性，进而在假设 PDR 气体温度与尘埃温度相关的情况下，结合辐射转移模型，可以对 PDR 内气体温度进行限制[76]。

[N II]205 μm 线与恒星形成率有很好的相关关系，同时还有易于激发[79]、受尘埃消光影响小、对金属丰度不敏感的特点。此外，对于高红移的星系，其 [N II]205 μm 线会移入 ALMA 等亚毫米波设备的观测频段，因此 [N II]205 μm 也有助于研究高红移的恒星形成活动。在 $L_{\rm IR} < 10^{12}L_\odot$ 且无 AGN 的 LIRGs 中，恒星形成率 SFR 与 [N II]205 μm 线光度 $L_{\rm [N\,II]}$ 的关系为[80]：

$$\lg SFR(M_\odot\cdot{\rm a}^{-1}) = (-5.31\pm0.32) + (0.95\pm0.05)\lg L_{\rm [N\,II]}(L_\odot) \quad . \tag{5}$$

后续的研究发现，这一关系会受到远红外颜色 $C(60/100) = f_{60}/f_{100}$($f_{60}$ 和 f_{100} 分别为由 IRAS 观测到的星系在 60 μm 和 100 μm 处的流量密度) 的轻微影响。如果能独立得到目标星系的 $C(60/100)$，则可以使用进行过颜色修正的关系得到不确定度更小的恒星形成率[101]。

CO 分子的转动谱线是除了原子精细结构谱线以外较为重要的气体冷却方式，同时也可以用来示踪恒星形成的原料 H_2 分子气体。通过 Herschel 的观测，天文学家们可以同时获得 CO 分子在不同转动能级之间跃迁产生的谱线信息，将这些谱线信息结合起来，就可以对气体的温度、密度以及其背后的加热机制进行分析。Lu 等人[82]分析了 65 个 (U)LIRGs 转动能级 J=4 ~ 13 的由 J 到 $J-1$ 的转动谱线的能量分布 (spectral line energy distribution, SLED)，发现其峰值并不随红外光度 $L_{\rm IR}$ 变化，而是随 $C(60/100)$ 变化，说明 SLED 的形

状由 $C(60/100)$ 所表征的辐射场强度决定；随着 $C(60/100)$ 的增大，SLED 峰值所在范围由 $C(60/100) \leqslant 0.6$ 时的 $J \lesssim 5$，变化为 $C(60/100) \geqslant 1.0$ 时的 $5 \lesssim J \lesssim 10$。同时，CO(6-5) 和 (7-6)与$L_{\rm IR}$ 之比不随 $C(60/100)$ 变化，表明可能存在两个气体成分：一个温度较高，在 $5 \lesssim J \lesssim 10$ 发出 CO 辐射，与正在进行的恒星形成活动相关；另一个冷成分，在 $J \lesssim 4$ 发出 CO 辐射，密度较低，与恒星形成无直接联系。随着$C(60/100)$ 升高，温度较高的成分逐渐占据主导，使 $5 \lesssim J \lesssim 10$ 的辐射增强。为了进一步确认不同 J 对应的加热机制，该研究进一步探究了 $5 \lesssim J \lesssim 10$ 的 CO 总辐射与 $L_{\rm IR}$ 之比 $\lg R_{\rm midCO}$ 与 $C(60/100)$ 之间的关系。对于星暴主导的星系，$\lg R_{\rm midCO}$ 几乎不随 $C(60/100)$ 改变，也有较小的弥散，均值为 -4.13，验证了正在进行的恒星形成活动对 $5 \lesssim J \lesssim 10$ 范围内 CO 辐射的主导作用。样本中一些内部存在强烈激波的星系，如 NGC 6240，其 $\lg R_{\rm midCO}$ 比较大；而 AGN 占主导的星系，如 Mrk 231 和 NGC 1068 的 $\lg R_{\rm midCO}$ 值则低于 -4.13，这主要是因为其中 CO 气体受到来自 AGN X 射线辐射的额外加热，使 CO 气体在 $J > 10$ 产生了不可忽视的辐射。

Lu 等人[83]通过对更大样本 (U)LIRGs 194 ~ 671μm 范围内的谱线进行研究，证实了上述结论，即 AGN 对 CO 的加热主要体现在 $J > 10$ 处，而 $5 \lesssim J \lesssim 10$ 的 CO 辐射则不受 AGN 影响；在修正过远红外颜色对 SLED 形状的影响后，星暴主导与 AGN 主导星系的 CO SLED 在这一范围内无明显差别，只不过 AGN 主导星系的 CO 辐射与红外辐射之比较低。于是，处于这一范围的 CO 线，例如 CO(7-6) 便可以用于示踪恒星形成率。事实上，CO(7-6) 与 $L_{\rm IR}$ 有相当紧密的关联，且不受 $C(60/100)$ 的影响，这表明 CO(7-6) 确实能很好地示踪恒星形成率[84]。在无 AGN 时，[N II]205 μm 与 CO(7-6) 的比值也与 $C(60/100)$ 相关，使得这两条线的比值可以限制尘埃温度。这两种方法同时也适用于探究较高红移星系的气体环境和恒星形成活动。

[C I]370 μm 有与 CO(1-0) 相似的临界密度，其与 [C I]609 μm 的线强比仅依赖于 $^3P_2$ 和 $^3P_1$ 两能级之间的激发温度，因此在局部热动平衡条件下，两者线强比可以限制气体温度。另外，在经典 PDR 模型中，[C I] 的发射区域位于 C^+ 与 CO 之间的过渡区域，所以 [C I] 辐射应与 CO 辐射相关联。Lu 等人[83]研究发现，整体上随着 J 的降低，[C I] 与 CO 的比值对 $C(60/100)$ 的依赖逐渐减弱，即 [C I] 辐射主要源于占大多数的、温度和密度都较低的分子气体，因此 [C I] 也可以用于估算星系内分子气体总质量。随后 Jiao 等人[85] 进一步确认了两条 [C I] 线与 CO(1-0) 线强度的线性关系。由于 [C I] 的辐射比 CO(1-0) 强，因此其比 CO(1-0) 更有助于研究高红移星系中冷的分子气体。

大多数 H_2O 分子以冰的形式附着在尘埃颗粒上[86]，仅在温分子气体中以蒸汽的形式存在，是丰度仅次于 CO 的含氧分子，主要以转动发射线或者背景连续谱上吸收的形式被探测到。激波、宇宙线和强 X 射线辐射场可能会导致较高的水丰度。Yang 等人[87]利用来自 Herschel 傅里叶变换分光仪 (Fourier transform spectrometer, FTS) 的光谱在 45 个近邻 (U)LIRGs 中寻找到了至少一条 H_2O 分子转动谱线，这些线均与 $L_{\rm IR}$ 有较好的线性关系。这一现象可以利用红外抽运机制进行解释，即吸收红外光子后，处于较高能级的 H_2O 分子会以不变的比例向低能级跃迁，故 H_2O 辐射会与 $L_{\rm IR}$ 正相关[88]。AGN 的存在并没有显著地改变各条 H_2O 线的探测率以及它们的强度与 $L_{\rm IR}$ 的线性关系，说明 AGN 并非 H_2O 激

发的主要能源。另外 H_2O 线的强度与 L_{IR} 的比例与 f_{60}/f_{100} 无相关性，而随 f_{25}/f_{60} 的增大而减小，意味着温度约 50 K 尘埃的辐射对水分子激发的贡献要大于温度约 100 K 尘埃的贡献。

2.6　(亚)毫米波段

(U)LIRGs (亚) 毫米波段的辐射由冷尘埃 ($T \approx 30\,\mathrm{K}$) 的连续辐射以及一系列分子，如 CO, HCN, HCO^+ 的转动谱线组成。ALMA 在亚毫米波段的高分辨率观测让我们可以获得星系中心区域尘埃和分子气体的精确分布，例如 García-Burillo 等人[89]和 Gallimore 等人[90]对 NGC 1068 中心 AGN 的尘埃环的观测。

CO(1-0) 线常用来示踪 H_2 分子气体，星系中 H_2 分子气体总质量与 CO 发射线强度之间的关系由 $\alpha = M(\mathrm{H_2})/L'_{\mathrm{CO}}$ 给出。α 的值在计算星系内分子气体总质量和恒星形成效率(即分子气体转化为恒星的效率，定义为星系远红外光度与 CO 发射线强度之比 $L_{\mathrm{FIR}}/L'_{\mathrm{CO}}$) 中起着至关重要的作用。在 (U)LIRGs 中，α 约为 $1.8^{+1.3}_{-0.8}\,M_{\odot}\cdot\mathrm{K^{-1}\cdot km^{-1}\cdot s\cdot pc^{-2}}$，显著低于一般旋涡星系的 α 值 (约 $4\,M_{\odot}\cdot\mathrm{K^{-1}\cdot km^{-1}\cdot s\cdot pc^{-2}}$)[91]。根据 ALMA 的观测，(U)LIRGs 中心约 100 pc 范围区域内汇聚有质量可达 $10^9\,M_{\odot}$ 的冷 H_2 分子气体[92, 93]。另外，(U)LIRGs 中分子气体质量占比 (分子气体质量与分子气体和恒星总质量之比) 亦随并合的进行而变化。在并合初期这一比例约为 18%，在并合中期升至 33%，而到了并合末期又降至 22%[94]。这意味着在并合初期，分布于星系各处的 H I 向星系中心区域集中，形成 H_2 分子；而在并合末期，这些分子气体被恒星形成和黑洞吸积大量消耗，同时也可能被 AGN 反馈释放出的能量解离。除了 CO(1-0)，已知亚毫米波段的尘埃辐射连续谱，我们也可以估算分子气体总质量[95]。

与 CO(1-0) 不同，前文提到的高转动能级之间跃迁产生的发射线，如 CO(6-5) 示踪的是温度、密度稍高 ($T \approx 100\,\mathrm{K}$, $n \geqslant 10^4\,\mathrm{cm^{-3}}$)，并与正在进行的恒星形成活动关系更加紧密的分子气体，其强度分布与恒星形成区分布高度相关[96–98]。使用 ALMA 对 CO(6-5) 进行的高分辨率观测,在一些近邻 (U)LIRGs 核心区域内发现了效率极高的恒星形成区 (恒星形成率面密度 $\Sigma_{\mathrm{SFR}} \geqslant 100\,M_{\odot}\cdot\mathrm{a^{-1}\cdot kpc^{-2}}$)[99, 100]。同时，Zhao 等人[101]观测到 NGC 7130 中 CO(6-5) 的峰值与由 AGN 主导的射电连续辐射的峰值在空间位置上存在差异，Cao 等人[102]随后在对 NGC 5135 的观测中亦发现在 AGN 所在位置并未显著探测到 CO(6-5)。这些高分辨率观测结果都在小于 100 pc 的尺度上验证了之前 Herschel 得出的结论，即 CO(6-5) 的激发主要依靠的是正在发生的恒星形成活动加热，AGN 的贡献则可以忽略不计。

在研究致密气体的特性以及演化时，一些丰度相对较低的分子发射线也十分重要。高分辨率观测可以精确测定这些线的强度、运动，并将其与特定的物理、化学过程相联系。HCN(1-0) 和 HCO^+(1-0) 由于较高的临界密度 (分别约为 $3\times10^6\,\mathrm{cm^{-3}}$ 和 $2\times10^5\,\mathrm{cm^{-3}}$)，也常用于示踪密度较高的气体[103–105]，然而它们产生机制较为复杂，并不单一地由星暴或 AGN 导致，而是与辐射场相互作用、气体密度等相关[106]。类似地，较高的 HCN(4-3)/HCO^+(4-3) 比值常被认为是受到了 AGN 的影响[107–109]，而 ALMA 对 NGC 1068 的观测却发现 AGN 所在位置的 HCN(4-3)/HCO^+ (约 1.3) 要低于距其约 200 pc 核周盘 (circumnuclear disk, CND) 处的值 (约 2.5)，说明解释两条线强度比的变化需要多种机制相结合[110]。

作为 HCN 的光解产物，CN 分子在强烈的辐射场中，特别是 X 射线主导区 (X-ray dominated region, XDR) 中会有明显的增丰。一些星系，如 NGC 3256 中的分子气体外向流中也存在明显的 CN 增丰，说明其由较强的辐射场驱动[111]。而受到激波影响的区域，除了上文提到的 H_2O 增丰以外，还会释放出 CH_3OH 分子，ALMA 对 VV 114 的观测就在其中并合发生的区域内观测到较强的 CH_3OH 发射[112]。

利用一些包含同位素的分子的谱线强度比，我们可以研究分子气体内部的物理环境以及元素增丰情况。Brown 和 Wilson[113] 使用 ALMA 观测了 3 个 ULIRGs 和 1 个 LIRG (Arp 220, IRAS F13120-5453, IRAS F17208-0014 以及 NGC 2623) 中的 CO 线，在这些系统中均发现了比一般产星星系低的 $^{13}CO/C^{18}O$ 值。由于 ^{18}O 主要来自 $M \gtrsim 8\,M_\odot$ 的大质量恒星，而 ^{13}C 则是 $M \lesssim 8\,M_\odot$ 的中小质量恒星中 CNO 循环的副产品，故较低的 $^{13}CO/C^{18}O$ 值就暗示着在 (U)LIRGs 中有更多大质量恒星产生，即 (U)LIRGs 有不同于一般产星星系的恒星初始质量函数 (initial mass function, IMF)。

2.7 射电波段

地面干涉阵进行的射电波段观测可以克服尘埃的影响，又有极高的分辨率，因此非常适合用于确定 (U)LIRGs 核心致密辐射源的位置以及研究其性质。

在各种类型星系中，红外辐射与射电辐射的关联是普遍存在的，这一关联体现在红外与射电辐射强度比 $q = \lg[(F_{\rm IR(8\sim1000\,\mu m)}/3.75\times10^{12}\,{\rm W\cdot m^{-2}})/(S_{1.4\,\rm GHz}/{\rm W\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}})]$ 为常数[114–116]。之所以会有这样的相关关系，是因为红外辐射主要来源于尘埃对年轻恒星辐射的吸收和再辐射，而射电辐射则由年轻恒星间接产生的热韧致辐射和非热同步辐射组成[117]。对于这一关系的偏离可能意味着源自 AGN 射电辐射的出现[118–120]。对 35 个 (U)LIRGs 的 VLA 观测，测得 $q = 2.75 \pm 0.27$，这与从包含更多不同类型的大样本星系中测得的值 (2.64 ± 0.26) 相符[121]。

射电连续谱的形状由谱指数 α ($S_\nu = \nu^{-\alpha}$，其中 S 为流量密度，ν 为观测频率) 描述。在光学薄的条件下，产星星系低频段 (例如 VLA 的 L 波段，$1 \sim 2\,\rm GHz$) 射电连续谱由同步辐射主导，$\alpha \approx 0.8$；而在高频 (如 Ka 波段，$26.5 \sim 40\,\rm GHz$)，热韧致辐射贡献提升，这时 $\alpha \approx 0.1$[117]。α 的空间分布可以用于区分 (U)LIRGs 核心区域的主要能量来源。距离中心 AGN 较远区域中的等离子体，因为被喷射出的时间较早，又失去了持续的能量供应，所以因为冷却失去了更多的能量，进而有较陡的射电谱 (α 值较大)[122]。这使 AGN 对应的 α 空间分布呈现由中心向外围不断增大的特征。致密的星暴则会因为光学厚的自由-自由吸收，在低频端形成比较平缓的谱[118, 123]；星暴越致密，连续谱越平缓。除此以外，AGN 有出现明显的射电喷流特征的几率[124]，同时有较高的亮温度 ($T_{\rm b} \gtrsim 10^5 \sim 10^6\,\rm K$)[118, 125]；恒星形成区形态则可能较为延展，且亮温度不超过 $10^{4.5}\,\rm K$[118]。基于 Condon 等人[118, 126] 使用 VLA 在 1.49 GHz 和 8.44 GHz 对大量 (U)LIRGs 所做的观测，Vardoulaki 等人[121] 分析了 35 个源中 AGN 的存在情况，在这 35 个(U)LIRGs 包含的总共 46 个子星系中，他们发现了 21 个射电 AGN、9 个星暴星系和 16 个 AGN/星暴混合星系。

VLA 的高分辨率还有助于精确测量星系中心辐射区域的尺寸，进而计算相应的辐

射面密度、恒星形成面密度和气体密度等。Barcos-Muñoz 等人[127]基于 33 GHz 观测数据计算了 22 个(U)LIRGs 的恒星形成面密度和红外辐射面密度，两者范围分别为 $10^{0.6} \sim 10^{4.1}\,M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot\mathrm{kpc}^{-2}$ 和 $10^{10.5} \sim 10^{14.1}\,L_\odot\cdot\mathrm{kpc}^{-2}$，其中最大值高于从已知任何其他星系中测得的值。

甚长基线干涉仪 (very long baseline interferometer, VLBI) 技术的发展使在 pc 尺度上确定 AGN 位置、测量恒星形成率等成为可能。相关工作例如 Herrero-Illana 等人[128]使用欧洲甚长基线干涉仪网络 (european VLBI network, EVN) 对 LIRG NGC 1614 做的观测。在 NGC 1614 核心区域 200 pc 范围内，VLBI C 波段 (5.0 GHz) 和 X 波段 (8.4 GHz) 观测没有发现任何致密射电源。这一观测结果排除了 NGC 1614 中存在 AGN 的可能，从而确认 NGC 1614 本质上是一个星暴星系。

3 (U)LIRGs 相关研究热点

与过去低分辨率观测研究相比，地面大口径望远镜上安装的自适应光学系统以及 ALMA 和 JVLA 等干涉阵，让天文观测的分辨率大大提升，天文学家们因此可以在较小的尺度上研究近邻星系中星团、气体团块以及星系中心超大质量黑洞等的特征。近邻 (U)LIRGs 为研究这三者提供了绝好的样本，近些年来对近邻 (U)LIRGs 研究所取得的进展也充分反映了这一由技术发展带来的改变。通过高分辨率的观测，我们可以对发生这些过程的气体环境进行更细致的研究，从而更好地量化这些过程在高红移星系演化过程中所起的作用。在 GOALS 研究成果的基础上，本章介绍近些年来利用各波段高分辨率设备对近邻 (U)LIRGs 中小尺度结构所做观测研究取得的成果，这些成果主要集中在三个领域，分别是恒星形成、气体外向流和星系中心超大质量黑洞演化。

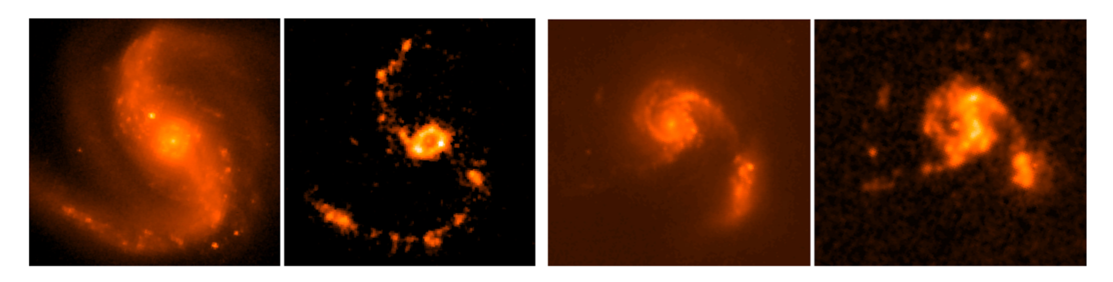
3.1 恒星形成

恒星形成在星系演化过程中扮演了重要角色，星系并合使得 (U)LIRGs 的恒星形成率比普通星系更高，其中 LIRGs 的恒星形成率约为 $10 \sim 100\,M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$，ULIRGs 则大于 100 $M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$[2]。在亚毫米波段对 (U)LIRGs 中分子气体的观测发现，(U)LIRGs 的恒星形成效率比普通星系更高，同时恒星形成效率亦随并合的进行而增大[98]。

近邻 (U)LIRGs 中恒星形成活动与普通星系最大的区别是集中在星系中心区域的星暴。由中红外光谱观测得到这些星暴年龄在 $1 \sim 4.5\,\mathrm{Ma}$，金属丰度约为 $1 \sim 2\,Z_\odot$[129]。高分辨率观测研究表明 (U)LIRGs 核心区域的恒星形成区常呈环状或者更致密的结构，恒星形成率和气体密度比一般星系中的恒星形成区高 10 倍或更高。Xu 等人[99, 100]使用 ALMA 分别观测了 NGC 34 核心半径 $r \approx 100\,\mathrm{pc}$ 范围内的致密星暴，以及 NGC 1614 核心内外半径分别为 100 和 350 pc 的环状恒星形成区的 CO(6-5) 发射线和尘埃连续谱，前者恒星形成面密度和分子气体面密度分别约为 $10^{2.9}\,M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot\mathrm{kpc}^{-2}$ 和 $10^{4.4}\,M_\odot\cdot\mathrm{pc}^{-2}$，后者平均恒星形成面密度和分子气体面密度则分别约为 $100\,M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot\mathrm{kpc}^{-2}$ 和 $10^{3.54}\,M_\odot\cdot\mathrm{pc}^{-2}$。经过分析，造成两者形态和物理特征巨大差异的原因之一是：NGC 34 经历的是质量比 3:1 至 3:2 之间的主

并合，NGC 1614 经历的则是质量比大于 4:1 的子并合，较大的质量比使 NGC 1614 中的气体受到的扭矩不足以使其落入星系最中心。另一个可能的解释是 NGC 1614 中的并合尚未进行到最后阶段，待并合完成后环状区域中的气体便会落入星系中心。

除了核心区域内的星暴，(U)LIRGs 中位于核心区域以外的恒星形成区的特征也与一般产星星系有所区别。Linden 等人[130]用 VLA 在 3 ~ 33 GHz 波段研究了 25 个 (U)LIRGs 中 48 个位于星系核心区域以外的恒星形成区。与由核心区域主导的星系整体射电辐射相比，这些核外恒星形成区有更为平缓的射电谱，这意味着在高频段，热辐射的贡献提升，并逐渐占据主导地位；在 33 GHz 处，热辐射成分的占比达到了 65%，与一般产星星系中的比例相近[131]。这些核外恒星形成区的恒星形成率为 $0.05 \sim 7.5\,M_\odot \cdot \mathrm{a}^{-1}$，而在更大的、同时包含普通星系和并合星系的样本中，位置相近的恒星形成区的恒星形成率为 $10^{-4} \sim 10^{-1}\,M_\odot \cdot \mathrm{a}^{-1}$[132]。类似地，Larson 等人[133]用 HST 窄带测光数据分析了 48 个 (U)LIRGs 的 Paα 和 Paβ 辐射，发现了总计 810 个恒星形成区 (见图 6)，半径为 90 ~ 900 pc，恒星形成率为 $10^{-3} \sim 10\,M_\odot \cdot \mathrm{a}^{-1}$。这一恒星形成率范围介于普通星系与利用引力透镜观测到的高红移星系中恒星形成区之间[134]，暗示着高红移处极端的恒星形成活动可能发生在与近邻 (U)LIRGs 类似的物理环境中。



注：图片来自 Larson, K. L., et al. Star-forming Clumps in Local Luminous Infrared Galaxies. ApJ, 2020, 888: 92, doi: 10.3847/1538-4357/ab5dc3. © AAS. Reproduced with permission。

图 6　NGC 6786 (左) 和 NGC 6090 (右) 的 HST/WFC3 F110W 图像和由去除了连续谱的 Paβ 线图像示踪的恒星形成区[133]

Song 等人[135]研究了 5 个普通星系和 4 个 LIRGs 核心区域环状的恒星形成区，发现 LIRGs 中环状结构的恒星形成率占星系总恒星形成率的 49% ~ 60%，在普通星系中则只占 7% ~ 40%。在这些环状结构中共有 57 个单独的恒星形成区，其中 LIRGs 中恒星形成区的恒星形成率和恒星形成面密度最高可达 $1.7\,M_\odot \cdot \mathrm{a}^{-1}$ 和 $400\,M_\odot \cdot \mathrm{a}^{-1} \cdot \mathrm{kpc}^{-2}$。这一研究结果暗示着恒星形成区最初分布于星系外围，随着并合的进行，大量气体落入星系中心，最终形成了致密的星暴。

尽管并合会加剧恒星形成，这一过程中形成的大质量星团的寿命却相当短。利用 HST 的近紫外和光学数据，Linden 等人[136]发现质量较大的星团数量随年龄有急剧下降的趋势。这意味着星系并合在产生大量恒星的同时，其产生的强烈潮汐作用也会以较高的速率瓦解掉新产生的星团。

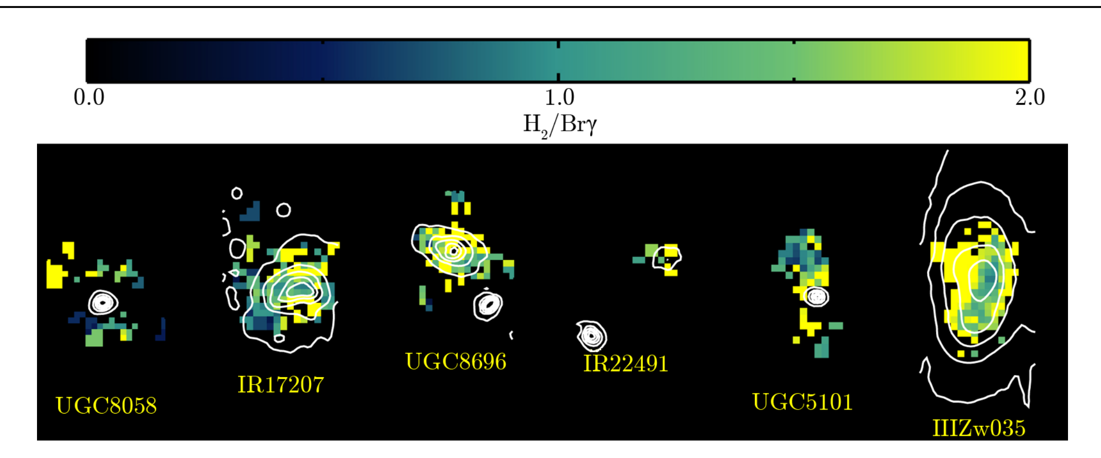
最后，Tan 等人[137]通过对 8 个极亮红外类星体 (ultraluminous infrared quasi-stellar objects, IR QSOs) CO(1-0) 进行观测，发现其中黑洞的吸积率 $\dot{M}_{\rm acc}$ 随恒星形成率 SFR 的增大而增大，且这一关联在恒星形成率增大了 3 个数量级的高红移 QSO 中依然存在。IR QSOs 作为 ULIRGs 和 QSOs 直接的过渡阶段，与 ULIRGs 有相近的分子气体质量以及恒星形成效率，被认为是星系并合过程中恒星形成活动强度最高的阶段[138]。Tan 等人的研究成果表明，在星系演化过程中恒星形成活动与 AGN 紧密相连，与前人工作中发现的 SMBHs 与其寄主星系自 $z\approx 2$ 以来便存在的协同演化关系相一致[139, 140]。

3.2 气体外向流

星系并合产生的星暴和 AGN 以气体外向流的方式将能量注入到星际介质中，进而影响寄主星系的演化。同时，外向流还起到改变尘埃和金属元素在星系内的分布，以及将尘埃和金属元素输送至星系际介质中的作用[141]。这些外向流由黑洞吸积盘[142]、大质量恒星星风和超新星爆发导致[143]，同时包含有分子、原子以及离子气体。在 (U)LIRGs 中，气体外向流的存在相当普遍，其中处于并合末期的 ULIRGs 被认为存在由 AGN 驱动的十分强劲的气体外向流；这些外向流足以驱散遮挡着星系核的尘埃和气体，因此 ULIRGs 最终演化为 QSOs[144]。NGC 6240 和 Arp 220 中电离气体的外向流首先由 Heckman 等人观测到[145, 146]。随后 Spitzer 则在一些 (U)LIRGs 的中红外光谱中发现了蓝移的高电离度离子 (如 [N III] 和 [N V]) 发射线[147, 148]，其中一部分有不能由气体绕星系中心旋转解释的较高蓝移速度，表明了 AGN 主导外向流的出现。

蓝移的 [Na I]5890 Å, 5896 Å 吸收线常用于示踪外向流中较冷的 H I 气体，许多使用地面望远镜进行的长缝光谱观测都基于这一特征，在 (U)LIRGs 中观测到星系尺度上的大范围外向流[149–151]。与长缝光谱相比，积分视场光谱仪的观测可以更加直观、准确地描绘外向流的空间分布。Rupke 和 Veilleux[152]使用北双子天文望远镜搭载的积分视场光谱仪 (Gemini Multi-object Spectrograph, GMOS) 在 ULIRG Mrk 231 中观测到速度为 $1\,100\,{\rm km\cdot s^{-1}}$，延展范围达到 $2\sim 3\,{\rm kpc}$ 的外向流；这一速度使其足以脱离星系而进入星系际空间。KOALA (Keck OSIRIS AO LIRG Analysis) 项目以 Keck 望远镜的红外积分视场光谱仪 (OH-suppressing Infrared Integral Field Spectrograph, OSIRIS) 观测了 21 个 (U)LIRGs K 波段的 H_2 转动-震动谱线和 Brγ 线，以 $H_2/{\rm Br}\gamma > 2$ 为判据，在其中 5 个 ULIRGs 和 1 个 LIRG 中发现了由受震激热 H_2 气体示踪的 AGN 外向流[153](见图 7)。受震激热 H_2 气体多在 ULIRGs 中被发现，或许是因为 ULIRGs 中有强度更高的星暴和更多的 AGN 对核心区域的气体进行加热，证据之一就是样本中 ULIRGs 的 $H_2/{\rm Br}\gamma$ 中间值为 1.43，与之前计算出的塞弗特星系的 $H_2/{\rm Br}\gamma$ 类似 (中间值为 1.41)[154]，表明 ULIRGs 与塞弗特星系一样，在星系中心区域有比 LIRGs 更多的热分子气体。

作为恒星形成的原料，冷 H_2 气体在外向流中占据了主导地位，质量占比可达 60%[155]。这意味着至少在星系中心区域，气体外向流是一种可以有效遏制恒星形成的机制。利用 Herschel 空间望远镜，天文学家们在 ULIRGs 中观测到蓝移的 OH 119 μm 吸收特征，从而发现质量流失率达 $100\,M_{\odot}\cdot {\rm a}^{-1}$ 的分子气体外向流[156–159]。在亚毫米波段，冷 H_2 气体的外向流也可以借助一些示踪分子的发射线由 ALMA 观测到，例如 Barcos-Muñoz 等人[160]通过



注：图片来自 U V, et al. Keck OSIRIS AO LIRG Analysis (KOALA): Feedback in the Nuclei of Luminous Infrared Galaxies. ApJ, 2019, 871: 166, doi: 10.3847/1538-4357/aaf1c2. © AAS. Reproduced with permission。

图 7 6 个存在气体外向流的星系中 H_2/Brγ 的分布[153]

观测 HCN(1-0) 线，在 Arp 220 内发现总质量超过 $10^6\,M_\odot$ 的外向流；Sakamoto 等人[111]利用 CO(1-0), (2-1) 和 (3-2) 线，在 NGC 3256 观测到由两个星系核分别发出的外向流。前文提到过，(U)LIRGs 也是椭圆星系的前身，这就需要其在这个阶段终止恒星形成活动，大质量分子气体外向流的存在就为这一终止过程的发生提供了证据。而在高红移宇宙，强烈的恒星形成和 AGN 活动更为普遍存在[161−164]，气体外向流在星系演化中所扮演的角色显得尤为重要。

3.3 超大质量黑洞演化

人们通过观测发现，星系中心超大质量黑洞的质量与其寄主星系的诸多特征，例如核球质量、光度以及核球内部恒星的速度弥散有很强的关联 ($M_{\rm BH}$-σ_* 关系)[165−168]。这些关系可由 AGN 反馈机制解释，即超大质量黑洞通过吸积使质量增长到一定程度时，就会触发 AGN 活动，吹散周围气体，进而同时终止黑洞吸积和周围恒星形成活动[169]。数值模拟表明星系并合是触发 AGN 活动的一种十分有效的机制[170]。在恒星质量相近的情况下，并合星系中 AGN 的比例高于孤立星系[171, 172]，AGN 的比例和平均光度亦随两星系之间距离的减小而增大[173, 174]。中等亮度的 X 射线 AGN 大都在非并合的盘星系中被找到[175−177]，与此同时，高亮度的 X 射线 AGN 多处于并合星系内[178−180]。这一切都说明并合过程在较亮 X 射线 AGN 的形成过程中起到重要作用。

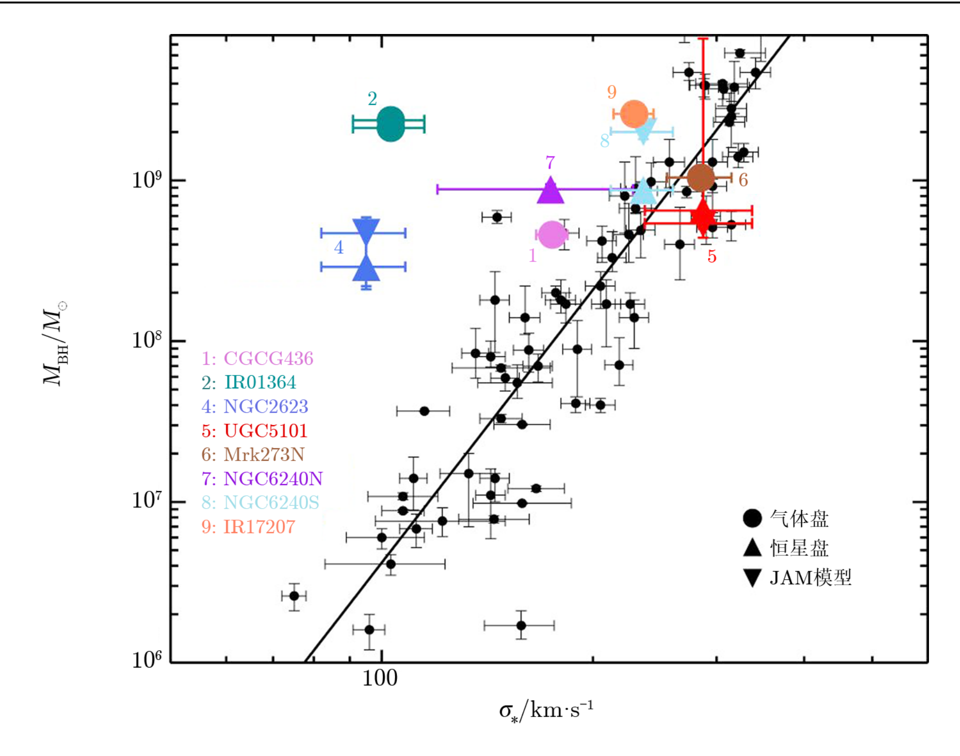
并合星系中，超大质量黑洞有许多被大量尘埃遮蔽，其中很大部分甚至是康普顿厚 (Compton-thick, CT) 的[181]，即视线方向上介质柱密度 $N_{\rm H} \geqslant 10^{24}\,{\rm cm^{-2}}$。康普顿厚 AGN 发出的能量低于 10 keV 的硬 X 射线辐射大多被介质吸收，取而代之的是由 AGN 发出，再经介质散射和反射的 X 射线辐射，这使康普顿厚 AGN 有较平的硬 X 射线谱。反射同时还使康普顿厚 AGN 在 6.4 keV 处的 Fe 线有较大的谱线宽度 (大于 1 keV)。由于 20 ∼ 30 keV 处的反射辐射峰[182]，康普顿厚 AGN 的 X 射线辐射在 10 keV 以上会显著上升，因此这一波

段非常适合进行 X 射线观测。

Ricci 等人[183]利用 NuSTAR 观测获取了 60 个 (U)LIRGs 10 ～ 24 keV 的数据，再加上 Chandra 2 ～ 10 keV 数据，共发现 35 个 X 射线 AGN，其中康普顿厚 AGN 的占比为 $46\% \pm 8\%$，高于近邻宇宙中以 X 射线观测挑选出的 AGN 中的比例 $(27\% \pm 4\%)$[184]。处于并合末期星系中的 AGN 有 $69^{+8}_{-9}\%$ 是康普顿厚的，在早期并合中则只有$33\% \pm 12\%$。康普顿厚 AGN 的比例和介质柱密度峰值均在并合星系的子星系相距 0.4 ～ 6 kpc 时出现，分别为 $74^{+14}_{-19}\%$ 和 $N_{\rm H} \approx (1.6 \pm 0.5) \times 10^{24}\,{\rm cm}^{-2}$。最终，将吸收改正过后，与未被大量尘埃遮蔽的 AGN 相比，康普顿厚 AGN 有较高的内禀 X 射线光度，这可能是因为其有充分的物质可供吸积，也可能是因为选择效应。以上研究的结果似乎暗示超大质量黑洞在并合末期较为活跃，其质量增长滞后于剧烈的恒星形成活动，使得星暴在多数情况下成为 (U)LIRGs 主要的能量来源。这与预期结果相符合，因为相比于在星系中心黑洞周围形成恒星，直接落入黑洞需要气体失去更多的角动量。然而通过对黑洞质量的测量，人们发现仍有一些黑洞相对较早地开始了通过吸积增大自身质量。

U 等人[185]通过分析 ULIRG Mrk 273 源自 OSIRIS 的观测数据，在其双黑洞中靠北的一个周围发现了半径约为 $0.3''$ (240 pc) 的旋转气体盘，进而由其光谱中 [Fe II] 线的运动，测得该黑洞质量为 $(1.04 \pm 0.1) \times 10^9 M_\odot$，与先前用脉泽测得的结果相一致[186]。随后的研究又在其他 (U)LIRGs 中发现了类似的恒星或气体盘结构，范围在 50 ～ 800 pc 质量在 $10^8 \sim 10^{10} M_\odot$，由此引出利用这些盘的运动测量超大质量黑洞的新方法[187]。OSIRIS K 波段 (1.965 ～ 2.381 μm) 对星系中心的观测受尘埃遮蔽影响较小，在自适应光学系统的帮助下，可以获得小于 $0.1''$ 范围内恒星和气体的运动情况。与之相比，传统测量超大质量黑洞的方法均不适用于 (U)LIRGs 这种受到强烈扰动，中心区域又被大量尘埃覆盖的星系。基于此方法，Medling 等人[188]用 Brγ 等发射线示踪气体并用 CO 吸收特征示踪恒星，测量了 9 个 (U)LIRGs 核心区域约 25 pc 范围内黑洞的动力学质量。在利用恒星运动进行测量时，开普勒盘和金斯轴对称质量模型 (Jeans axisymmetric mass model, JAM)[189]分别被用于得到黑洞质量下限和上限。最后测得这些黑洞质量为 $10^7 \sim 10^9 M_\odot$。图 8 给出了这些黑洞质量 $M_{\rm BH}$ 与其寄主星系核球中恒星速度弥散 σ_* 的关系，由气体盘得到的黑洞质量由圆圈表示，由恒星盘得到的黑洞质量由正三角表示，由 JAM 模型得到的黑洞质量由倒三角表示，其中大部分黑洞位于 McConnell 和 Ma 给出的 $M_{\rm BH}$-σ_* 关系上方[190]。假设这些超大质量黑洞的寄主星系在并合发生前和并合完成后均遵循 $M_{\rm BH}$-σ_* 关系，这意味着并合过程中黑洞的质量增长超过其周围寄主星系的恒星形成，进而与之前的结论产生了出入。

需要注意的是，上述方法测得的动力学质量仍是黑洞与其吸积盘，以及可能存在的分子气体的质量之和。为了确定分子气体产生的影响，Medling 等人[191]分析了 ALMA 在 242 GHz 波段对 NGC 6240 的观测数据，并计算了其中两个超大质量黑洞周围半径约 30 pc 范围内分子气体的质量。由尘埃连续谱和 CO(2-1) 发射线求得南侧黑洞周围分子气体质量分别为 $(7.7 \pm 0.5) \times 10^8 M_\odot$ 和 $(1.2 \pm 0.7) \times 10^8 M_\odot$，占原本动力学质量 6% ～ 89%；北侧黑洞则分别为 $(9.8 \pm 0.7) \times 10^7 M_\odot$ 和 $(4.2 \pm 2.3) \times 10^7 M_\odot$，占原本动力学质量 5% ～ 11%。去除了这部分分子气体质量后，南侧黑洞回归了 $M_{\rm BH}$-σ_* 关系，而北侧黑洞仍显著高于



注：图片来自 Medling A M, et al. Following Black Hole Scaling Relations Through Gas-Rich Mergers. ApJ, 2015, 803: 61, doi: doi:10.1088/0004-637X/803/2/61. © AAS. Reproduced with permission。

图 8 (U)LIRGs 在 M_{BH}-σ_* 关系图中的分布[188]

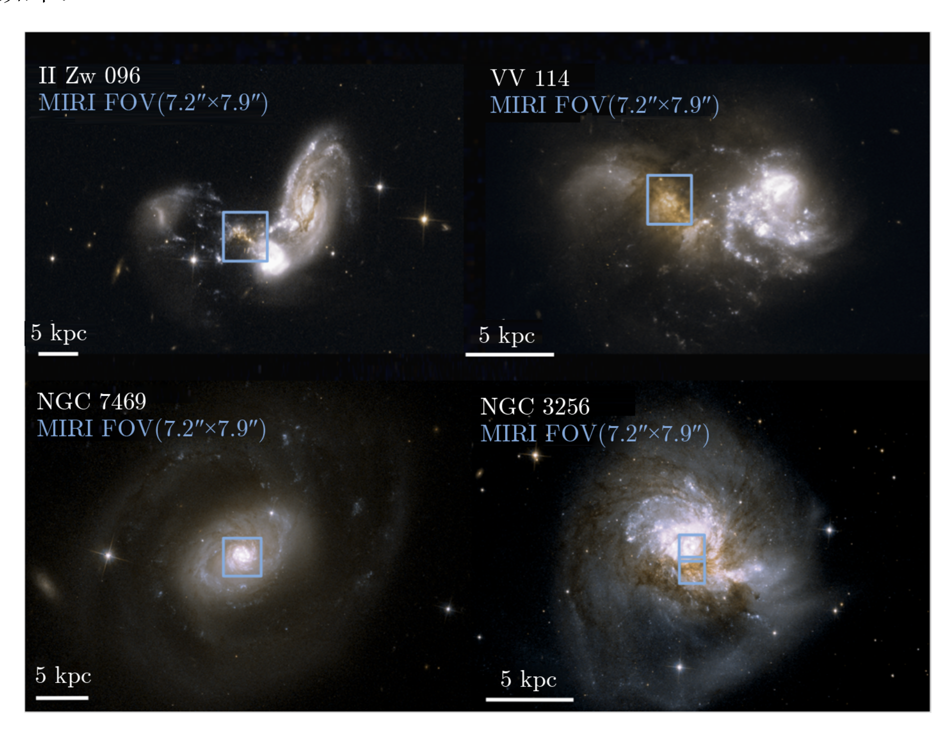
M_{BH}-σ_* 关系。由此可以得出结论，利用动力学方法测得的超大质量黑洞质量需要对其中包含的分子气体质量进行改正，而这一改正的具体值需要大量的类似观测予以确认。考虑到不活跃黑洞与类似 (U)LIRGs 中 AGN 这样较活跃黑洞周围分子气体的质量应当有较大差异，修正分子气体质量对准确测量不同种类星系中心黑洞质量，进而建立黑洞与其寄主星系演化关系十分重要。

4 未来展望

2021 年 12 月 25 日，备受瞩目的韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 发射升空。JWST 6.5 m 口径的主镜使其在中红外波段拥有 50 ~ 100 倍于 Spitzer 的灵敏度和 10 倍以上的空间分辨率；在低红移处，极高的空间和光谱分辨率让天文学家们可以在 100 pc 的尺度上研究原子、分子气体以及尘埃的物理状态，从而更细致地了解大质量恒星和星系中心黑洞对周围环境的影响，以及并合星系中气体的运动。

GOALS 团队已经被选为 JWST 提前批公开科学 (Early Release Science, ERS) 团队，将使用其首批科学观测数据进行研究，并为后续相关研究提供指引。为此 GOALS 团队选取

了 4 个处于不同并合阶段、拥有不同能量来源和中红外光谱特征的 (U)LIRGs (见图 9)，具体描述如下：



注：图片来自 https://goals.ipac.caltech.edu/page/ers.

图 9　GOALS 团队选定的 4 个观测目标，蓝色方框为将使用 MIRI IFU 观测的区域

(1) II Zw 096，$L_{\rm IR} = 10^{11.94}L_\odot$，由两个相距 8.4 kpc 的星系并合形成，同时包含星暴和 AGN。观测显示其超过 80% 的红外辐射来自于除了两个星系核以外的第三个致密源 (光度密度约 $10^{14}L_\odot \cdot {\rm kpc}^{-2}$)[192]。通过脉泽测得这个致密源的质量约 $10^9 M_\odot$[193]，意味着这可能是该系统中的第三个星系核，但其本质至今尚未查明。

(2) VV 114，$L_{\rm IR} = 10^{11.71}L_\odot$，由东西间隔 6 kpc 的两个子星系组成的早期并合星系，并合产生的潮尾延展至距星系核心 25 kpc 处。东西两个子星系分别主导整个并合星系的红外和紫外辐射，同时东侧子星系中有分子气体外向流特征，说明可能存在 AGN。

(3) NGC 7469，$L_{\rm IR} = 10^{11.65}L_\odot$，其伴星系 IC 4283 位于其北方约 26 kpc 处。在其核心区域有一塞弗特 I 型 AGN，周围环绕半径约为 1.8″ 的环状恒星形成区。对 Brγ 线的观测表明，这一星系中存在从星系核心向外延伸的气体外向流[153]。

(4) NGC 3256，$L_{\rm IR} = 10^{11.64}L_\odot$，处于并合晚期阶段，其中靠南的星系核被大量气体和尘埃覆盖，只在红外波段可见。两个星系核均有外向流特征，有证据表明靠南星系核的外向流由 AGN 驱动[111]。另外在星系核心区域 20″ 范围以内有大量星团。

GOALS 团队将使用 JWST 上的近红外照相机 (near-infrared camera, NIRCam) 和中红外设备 (mid-infrared instrument, MIRI) 对这 4 个星系进行多波段图像观测，同时用近红

外光谱仪 (near-infrared spectrograph, NIRSpec) 和中红外设备中的积分视场光谱仪单元获取其 0.5 ∼ 28 μm 范围内的光谱，进而研究这些星系的能量来源、外向流的产生机制以及 AGN 与星暴的相互作用等，为今后更多类似的研究奠定基础。

此外，到 2030 年，拥有 263 个天线的下一代甚大阵 (Next-generation Very Large array, ngVLA) 将取代 27 个天线的甚大阵，届时其灵敏度将比现在的 VLA 和 ALMA 提高 10 倍。借助先进的观测仪器，天文学家可以对近邻以及高红移 (极) 亮红外星系中的恒星形成和黑洞演化进行更精细的研究，从而使人们深入认识星系形成与演化。

致谢

感谢审稿人对本文提出的宝贵修改意见。感谢北京师范大学天文系余恒副教授对本文提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] Sanders D B, Mazzarella J M, Kim D C, et al. AJ, 2003, 126: 1607
[2] Sanders D B, Mirabel I F. ARA&A, 1996, 34: 749
[3] Arribas S, Colina L, Alonso-Herrero A, et al. A&A, 2012, 541: 20
[4] Hung C L, Sanders D B, Casey C M, et al. ApJ, 2014, 791: 63
[5] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. ApJ, 1988, 325: 74
[6] Genzel R, Tacconi L J, Rigopoulou D, et al. ApJ, 2001, 563: 527
[7] Tacconi L J, Genzel R, Lutz D, et al. ApJ, 2002, 580: 73
[8] Elbaz D, Cesarsky C, Chanial P, et al. A&A, 2002, 384: 848
[9] Le Floc'h E, Papovich C, Dole H, et al. ApJ, 2005, 632: 169
[10] Caputi K I, Dole H, Lagache G, et al. A&A, 2006, 454: 143
[11] Evans A. NGC 6240. https://esahubble.org/images/heic0810ai/, 2008
[12] Evans A. HUBBLE INTERACTING GALAXY ARP 220. https://hubblesite.org/contents/media/images/2008/16/2314-Image.html, 2008
[13] Armus L, Mazzarella J M, Evans A S, et al. PASP, 2009, 121: 559
[14] Lonsdale C J, Farrah D, Smith H E. arXiv:0603031, 2006
[15] Lutz D. ARA&A, 2014, 52: 373
[16] Armus L, Charmandaris V, Soifer B T. NatAs, 2020, 4: 467
[17] Pérez-Torres M, Mattila S, Alonso-Herrero A, et al. A&ARv, 2021, 29: 2
[18] Ptak A, Heckman T, Levenson N A, et al. ApJ, 2003, 592: 782
[19] Franceschini A, Braito V, Persic M, et al. MNRAS, 2003, 343: 1181
[20] Ranalli P, Comastri A, Setti G. A&A, 2003, 399: 39
[21] Grimm H J, Gilfanov M, Sunyaev R. MNRAS, 2003, 339: 793
[22] Gilfanov M, Grimm H J, Sunyaev R. MNRAS, 2004, 347: 57
[23] Young J S, Scoville N Z. ARA&A, 1991, 29: 581
[24] Kennicutt R C Jr. ARA&A, 1998, 36: 189
[25] Iwasawa K, Sanders D B, Evans A S, et al. ApJ, 2009, 695: 103
[26] Iwasawa K, Sanders D B, Teng S H, et al. A&A, 2011, 529: 106
[27] Torres-Albà N, Iwasawa K, Díaz-Santos T, et al. A&A, 2018, 620: 140
[28] Kong X, Charlot S, Brinchmann J, et al. MNRAS, 2004, 349: 769
[29] Howell J H, Armus L, Mazzarella J M, et al. ApJ, 2010, 715: 572

[30] Meurer G R, Heckman T M, Calzetti D. ApJ, 1999, 521: 64
[31] Cortese L, Boselli A, Buat V, et al. ApJ, 2006, 637: 242
[32] Charlot S, Fall S M. ApJ, 2000, 539: 718
[33] Alonso-Herrero A, Rieke G H, Rieke M J, et al. ApJ, 2006, 650: 835
[34] Haan S, Surace J A, Armus L, et al. AJ, 2011, 141: 100
[35] Dasyra K M, Yan L, Helou G, et al. ApJ, 2008, 680: 232
[36] Bell E F, Papovich C, Wolf C, et al. ApJ, 2005, 625: 23
[37] Melbourne J, Koo D C, Le Floc'h E. ApJ, 2005, 632: L65
[38] Kim D C, Evans A S, Vavilkin T, et al. ApJ, 2013, 768: 102
[39] Peng C, Ho L C, Impey C D, et al. AJ, 2002, 124: 266
[40] Sérsic J L. BAAA, 1963, 6: 41
[41] Aguerri J A L, Méndez-Abreu J, Corsini E M. A&A, 2009, 495: 491
[42] Veilleux S, Kim D C, Sanders D B, et al. ApJS, 1995, 98: 171
[43] Rich J A, Kewley L J, Dopita M A. ApJS, 2015, 221: 28
[44] Rich J A, Dopita M A, Kewley L J, et al. ApJ, 2010, 721: 505
[45] Rich J A, Kewley L J, Dopita M A. ApJ, 2011, 734: 87
[46] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. PASP, 1981, 93: 5
[47] Veilleux S, Osterbrock D E. ApJS, 1987, 63: 295
[48] Kewley L J, Dopita M A, Sutherland R S, et al. ApJ, 2001, 556: 121
[49] Davies R L, Rich J A, Kewley L J, et al. MNRAS, 2014, 439: 3835
[50] U V, Sanders D B, Mazzarella J M, et al. ApJS, 2012, 203: 9
[51] Piqueras L J, Colina L, Arribas S, et al. A&A, 2013, 553: 85
[52] Rieke G H, Lebofsky M J. ApJ, 1985, 288: 618
[53] Larkin J E, Armus L, Knop R A, et al. ApJS, 1998, 114: 59
[54] Veilleux S, Sanders D B, Kim D C. ApJ, 1997, 484: 92
[55] Murphy T W, Soifer B T, Matthews K, et al. AJ, 2001, 121: 97
[56] Medling A M, U V, Rich J A, et al. MNRAS, 2015, 448: 2301
[57] Díaz-Santos T, Charmandaris V, Armus L, et al. ApJ, 2010, 723: 993
[58] Desert F X, Boulanger F, Puget J L. A&A. 1990. 237: 215
[59] Smith J D T, Draine B T, Dale D A, et al. ApJ, 2007, 656: 770
[60] Voit G M. MNRAS, 1992, 258: 841
[61] Siebenmorgen R, Krugel E, Spoon H W W. A&A, 2004, 414: 123
[62] Stierwalt S, Armus L, Surace J A, et al. ApJS, 2013, 206: 1
[63] Armus L, Charmandaris V, Bernard-Salas J, et al. ApJ, 2007, 656: 148
[64] Armus L, Bernard-Salas J, Spoon H W W, et al. ApJ, 2006, 640: 204
[65] Lee J C, Hwang H S, Lee M G, et al. ApJ, 2012, 756: 95
[66] Inami H, Armus L, Matsuhara H, et al. A&A, 2018, 617: 130
[67] Imanishi M, Dudley C C, Maiolino R, et al. ApJS, 2007, 171: 72
[68] Nardini E, Risaliti G, Salvati M, et al. MNRAS, 2008, 385: 130
[69] Petric A O, Armus L, Howell J, et al. ApJ, 2011, 730: 28
[70] Veilleux S, Rupke D S N, Kim D C, et al. ApJS, 2009, 182: 628
[71] Higdon S J U, Armus L, Higdon J L, Soifer, et al. ApJ, 2006, 648: 323
[72] Stierwalt S, Armus L, Charmandaris V, et al. ApJ, 2014, 790: 124
[73] Stacey G J, Geis N, Genzel R, et al. ApJ, 1991, 373: 423
[74] Helou G, Malhotra S, Hollenbach D J, et al. ApJL, 2001, 548: 73
[75] Díaz-Santos T, Armus L, Charmandaris V, et al. ApJ, 2013, 774: 68
[76] Díaz-Santos T, Armus L, Charmandaris V, et al. ApJ, 2017, 846: 32
[77] Farrah D, Lebouteiller V, Spoon H W W, et al. ApJ, 2013, 776: 38
[78] Rosenberg M J F, van der Werf P P, Aalto S, et al. ApJ, 2015, 801: 72

[79] Oberst T E, Parshley S C, Stacey G J, et al. ApJL, 2006, 652: L125
[80] Zhao Y, Lu N, Xu C K, et al. ApJL, 2013, 765: 13
[81] Zhao Y, Lu N, Xu C K, et al. ApJ, 2016, 819: 69
[82] Lu N, Zhao Y, Xu C K, et al. ApJL, 2014, 787: L23
[83] Lu N, Zhao Y, Díaz-Santos T, et al. ApJS, 2017, 230: 1
[84] Lu N, Zhao Y, Xu C K, et al. ApJL, 2015, 802: L11
[85] Jiao Q, Zhao Y, Zhu M, et al. ApJL, 2017, 840: L18
[86] van Dishoeck E F, Kristensen L E, Benz A O, et al. PASP, 2011, 123: 138
[87] Yang C, Gao Y, Omont A, et al. ApJL, 2013, 771: L24
[88] Gonźalez-Alfonso E, Fischer J, Isaak K, et al. A&A, 2010, 518: L43
[89] García-Burillo S, Combes F, Ramos Almeida C, et al. ApJL, 2016, 823: L12
[90] Gallimore J F, Elitzur M, Maiolino R, et al. ApJL, 2016, 829: L7
[91] Herrero-Illana R, Privon G C, Evans A S, et al. A&A, 2019, 628: 71
[92] Scoville N, Sheth K, Walter F, et al. ApJ, 2015, 800: 70
[93] Treister E, Messias H, Privon G C, et al. ApJ, 2020, 890: 149
[94] Larson K L, Sanders D B, Barnes J E, et al. ApJ, 2016, 825: 128
[95] Scoville N, Sheth K, Aussel H, et al. ApJ, 2016, 820: 83
[96] Yao L, Seaquist E R, Kuno N, et al. ApJ, 2003, 588: 771
[97] Wilson C D, Petitpas G R, Iono D, et al. ApJS, 2008, 178: 189
[98] Iono D, Wilson C D, Yun M S, et al. ApJ, 2009, 695: 1537
[99] Xu C K, Cao C, Lu N, et al. ApJ, 2014, 787: 48
[100] Xu C K, Cao C, Lu N, et al. ApJ, 2015, 799: 11
[101] Zhao Y, Lu N, Xu C K, et al. ApJ, 2016, 820: 118
[102] Cao T, Lu N, Xu C K, et al. ApJ, 2018, 866: 117
[103] Solomon P M, Downes D, Radford S J E. ApJL, 1992, 387: 55
[104] Gao Y, Solomon P M. ApJ, 2004, 606: 271
[105] García-Burillo S, Usero A, Alonso-Herrero A, et al. A&A, 2012, 539: 8
[106] Privon G C, Herrero-Illana R, Evans A S, et al. ApJ, 2015, 814: 39
[107] García-Burillo S, Graciá-Carpio J, Guélin M, et al. ApJ, 2006, 645: L17
[108] Imanishi M, Nakanishi K, Tamura Y, et al. AJ, 2007, 134: 2366
[109] Krips M, Martín S, Eckart A, et al. ApJ, 2011, 736: 37
[110] García-Burillo S, Combes F, Usero A, et al. A&A, 2014, 567: A125
[111] Sakamoto K, Aalto S, Combes F, et al. ApJ, 2014, 797: 90
[112] Saito T, Iono D, Espada D, et al. ApJ, 2017, 834: 6
[113] Brown T, Wilson C D. ApJ, 2019, 879: 17
[114] Helou G, Soifer B T, Rowan-Robinson M. ApJL, 1985, 298: 7
[115] Murphy E J. ApJ, 2009, 706: 482
[116] Ivison R J, Swinbank A M, Swinyard B, et al. A&A, 2010, 518: 35
[117] Condon J J. ARA&A, 1992, 30: 575
[118] Condon J J, Huang Z P, Yin Q F, et al. ApJ, 1991, 378: 65
[119] Lonsdale C J, Smith H E, Lonsdale C J. ApJ, 1995, 438: 632
[120] Sajina A, Yan L, Lutz D, et al. ApJ, 2008, 683: 659
[121] Vardoulaki E, Charmandaris V, Murphy E J, et al. A&A, 2015, 574: 4
[122] Carilli C L, Barthel P D. A&ARv, 1996, 7: 1
[123] Murphy E J, Stierwalt S, Armus L, et al. ApJ, 2013, 768: 2
[124] Lonsdale C J, Lonsdale C J, Smith H E, et al. ApJ, 2003, 592: 804
[125] Clemens M S, Vega O, Bressan A, et al. A&A, 2008, 477: 95
[126] Condon J J, Helou G, Sanders D B, et al. ApJS, 1990, 73: 359
[127] Barcos-Munñoz L, Leroy A K, Evans A S, et al. ApJ, 2017, 843: 117

[128] Herrero-Illana R, Alberdi A, Pérez-Torres M Á, et al. MNRAS, 2017, 470: 112
[129] Inami H, Armus L, Charmandaris V, et al. ApJ, 2013, 777: 156
[130] Linden S T, Song Y, Evans A S, et al. ApJ, 2019, 881, 70
[131] Murphy E J, Bremseth J, Mason B S, et al. ApJ, 2012, 761: 97
[132] Smith B J, Zaragoza-Cardiel J, Struck C, et al. AJ, 2016, 151: 63
[133] Larson K L, Díaz-Santos T, Armus L, et al. ApJ, 2020, 888: 92
[134] Livermore R C, Jones T, Richard J, et al. MNRAS, 2015, 450: 1812
[135] Song Y, Linden S T, Evans A S, et al. ApJ, 2021, 916: 73
[136] Linden S T, Evans A S, Larson K, et al. ApJ. 2021. 923: 278
[137] Tan Q H, Gao Y, Kohno K, et al. ApJ, 2019, 887: 24
[138] Xia X Y, Gao Y, Hao C N, et al. ApJ, 2012, 750: 92
[139] Daddi E, Alexander D M, Dickinson M, et al. ApJ, 2007, 670: 173
[140] Mullaney J R, Daddi E, Béthermin M, et al. ApJL, 2012, 753: L30
[141] Erb D K. Nature, 2015, 523: 169
[142] King A, Pounds K. ARA&A, 2015, 53: 115
[143] Hopkins P F. MNRAS, 2012, 420: 8
[144] Debuhr J, Quataert E, Ma C P. MNRAS, 2012, 420: 2221
[145] Heckman T M, Armus L, Miley G K. AJ, 1987, 93: 276
[146] Heckman T M, Armus L, Miley G K. ApJS, 1990, 74: 833
[147] Spoon H W W, Armus L, Marshall J A, et al. ApJ, 2009, 693: 1223
[148] Spoon H W W, Holt J. ApJL, 2009, 702: 42
[149] Heckman T, Lehnert M D, Strickland D K, et al. ApJS, 2000, 129: 493
[150] Martin C L. ApJ, 2005, 621: 227
[151] Rupke D S N, Veilleux S, Sanders D B. ApJS, 2005, 160: 115
[152] Rupke D S N, Veilleux S. ApJL, 2011, 729: 27
[153] U V, Medling A M, Imami H, et al. ApJ, 2019, 871: 166
[154] Colina L, Piqueras L J, Arribas S, et al. A&A, 2015, 578: A48
[155] Fluetsch A, Maiolino R, Carniani S, et al. MNRAS, 2021, 505: 5753
[156] Fischer J, Sturm E, González-Alfonso E, et al. A&A, 2010, 518: 41
[157] Sturm E, González-Alfonso E, Veilleux S, et al. ApJ, 2011, 733: 16
[158] Spoon H W W, Farrah D, Lebouteiller V, et al. ApJ, 2013, 775: 127
[159] Veilleux S, Melendez M, Sturm E, et al. ApJ, 2013, 776: 27
[160] Barcos-Muñoz L, Aalto S, Thompson T A, et al. ApJ, 2018, 853: 28
[161] Brusa M, Bongiorno A, Cresci G, et al. MNRAS, 2015, 446: 2394
[162] Talia M, Cimatti A, Brusa M, et al. MNRAS, 2017, 471: 4527
[163] Föerster-Schreiber N M, Renzini A, Mancini C, et al. ApJS, 2018, 238: 21
[164] Kakkad D, Mainieri V, Vietri G, et al. A&A, 2020, 642: A147
[165] Magorrian J, Tremaine S, Richstone D, et al. AJ, 1998, 115: 2285
[166] Ferrarese L, Merritt D. ApJ, 2000, 539: 9
[167] Gebhardt K, Bender R, Bower G, et al. ApJ, 2000, 539: 13
[168] Kormendy J, Ho L C. ARA&A, 2013, 51: 511
[169] Croton D J, Springel V, White S D M, et al. MNRAS, 2006, 365: 11
[170] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. Nature, 2005, 433: 604
[171] Koss M, Mushotzky R, Veilleux S, et al. ApJ, 2010, 716: 125
[172] Silverman J D, Kampczyk P, Jahnke K, et al. ApJ, 2011, 743: 2
[173] Ellison S L, Patton D R, Mendel J T, et al. MNRAS, 2011, 418: 2043
[174] Koss M, Mushotzky R, Treister E, et al. ApJ, 2012, 746: 22
[175] Koss M, Mushotzky R, Veilleux S, et al. ApJ, 2011, 739: 57
[176] Kocevski D D, Faber S M, Mozena M, et al. ApJ, 2012, 744: 148

[177] Schawinski K, Simmons B D, Urry C M, et al. MNRAS, 2012, 425: 61
[178] Treister E, Schawinski K, Urry C M, et al. ApJ, 2012, 758: 39
[179] Glikman E, Simmons B, Mailly M, et al. ApJ, 2015, 806: 218
[180] Hong J, Im M, Kim M, et al. ApJ, 2015, 804: 34
[181] Koss M, Mushotzky R, Baumgartner W, et al. ApJ, 2013, 765: 26
[182] Koss M J, Assef R, Baloković M, et al. ApJ, 2016, 825: 85
[183] Ricci C, Privon G C, Pfeifle R W, et al. MNRAS, 2021, 506: 5935
[184] Ricci C, Ueda Y, Koss M J, et al. ApJ, 2015, 815: 13
[185] U V, Medling A M, Sanders D B, et al. ApJ, 2013, 775: 115
[186] Klöckner H R, Baan W A. A&A, 2004, 419: 887
[187] Medling A M, U V, Guedes J, et al. ApJ, 2014, 784: 70
[188] Medling A M, U V, Max C E, et al. ApJ, 2015, 803: 61
[189] Cappellari M. MNRAS, 2008, 390: 71
[190] McConnell N J, Ma C P. ApJ, 2013, 764: 184
[191] Medling A M, Privon G C, Barcos-Muñoz L, et al. ApJL, 2019, 885: 21
[192] Inami H, Armus L, Surace J A, et al. AJ, 2010, 140: 63
[193] Migenes V, Coziol R, Cooprider K, et al. MNRAS, 2011, 416: 1267

Progress in Observational Studies of Local Luminous Infrared Galaxies

GAO Tian-mu[1], U Vivian[2], SONG Yi-qing[3]

(1. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Physics and Astronomy, University of California, Irvine, CA 92697, USA; 3. Department of Astronomy, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA)

Abstract: (Ultra) Luminous infrared galaxies ((U)LIRGs, $L_{\rm IR} \geqslant 10^{11(12)} L_{\odot}$) play an important role in the evolution of galaxies. Most of the (U)LIRGs are the consequences of mergers between gas-rich spirals, which lead to intense starbursts and possible AGN activity. The re-emission from the dust heated by starbursts and/or AGN is a key process that is responsible for the high infrared luminosity of (U)LIRGs.

With the rapid development of instruments, substantial progress has been made in observing nearby (U)LIRGs. In this review article, we first present the multi-wavelength properties of nearby (U)LIRGs obtained by the latest observational studies. Then, we introduce several research topics relating to (U)LIRGs. Future observing plans are also discussed at the end of this paper.

Key words: galaxy evolution; (ultra)luminous infrared galaxies; star formation; active galactic nuclei